

Flyveaskebeton

Proportionering og tæthed overfor indtrængning af kloridioner og vand

Hedegård, Søren Erik; Hansen, Torben C

Publication date:
1990

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Hedegård, S. E., & Hansen, T. C. (1990). Flyveaskebeton: Proportionering og tæthed overfor indtrængning af kloridioner og vand. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU). (BYG Rapport; Nr. TR-221).

DTU Library

Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**Flyveaskebeton.
Proportionering og tæthed
overfor
indtrængning af kloridioner og vand.**

Søren Erik Hedegård

Juli 1990

Erratum til Teknisk Rapport nr. 221/90.

Side	Tekst	Rettelse
8 ¹⁶	indtrængningstider	indtrængningsdybder
14 ³	K_d , som angiver hvor mange kg flyveaske,	K_d , som angiver flyveaskens reaktionsevne i forhold til cementens reaktionsevne. Den resiprokke værdi af K_d angiver således hvor mange kg flyveaske, der kan erstatte 1 kg cement,
15 ⁷	, faste, runde, men hule partikler..	, faste, runde, ofte hule partikler..
41 ₅	..de øvre grænser for gyldigheden..	..de nedre grænser for gyldigheden..
43 ₁₁	er forskellig fra nul	er lig med nul
56 ₁₅	Koncentrationen af kloridioner,..	Koncentrationen af hydroxylioner,..
58 ₈	.. for kloridioner, ($\text{mm}^3/\text{år}$)	..for kloridioner, ($\text{mm}^2/\text{år}$)
99 ₈	.. ialt 15 betoner uden flyveaske,	..ialt 15 permeabilitetskoefficienter for betoner uden flyveaske,
123 ¹	(REFERENCEBLANDINGERASKE)	(REFERENCEBLANDINGER)
138 (Tabel 7.6d, $c/v=1$, $f/v=1.2$, 56 døgn)	>415	>215
177 (Figur 7.11d, $c/v=2.2$, $f/v=0.8$)	275	>275
177 ₅	..betoner i serie 1..	..betoner i serie 2..
178 ₅	..betoner i serie 1..	..betoner i serie 3..
179 ₅	..betoner i serie 1..	..betoner i serie 4..
183 (Figur 8.3)		(X-aksen er skaleret forkert, hvilket medfører at linien for 35% flyveaske gennem (0,0) ikke er helt korrekt indtegnet.)

0 FORORD

Denne afhandling er udarbejdet som et led i betingelserne for at opnå den tekniske licentiatgrad ved Danmarks Tekniske Højskole. Arbejdet er udført ved Laboratoriet for Bygningsmaterialer med Professor Torben C. Hansen som faglærer.

Forfatteren vil specielt gerne takke Torben C. Hansen for hans inspiration og vejledning, som har været af største betydning for gennemførelse og færdiggørelse af dette projekt. Desuden takkes samtlige nuværende og tidligere medarbejdere ved LBM for den hjælp, der er modtaget under projektarbejdet. Endvidere rettes en tak til medarbejdere ved Korrosionscentralen for vejledning vedrørende de elektrokemiske undersøgelser og udbygning af scanningsapparatet.

Statens Teknisk-videnskabelige Forskningsråd har støttet projektet ved at bidrage med midler til apparatur, drift og senere med løn til studiets færdiggørelse.

Aalborg Portland, Cements i Malmø, samt firmaet Danaske har bidraget med materialer og Cement og Betonlaboratoriet i Aalborg har hjulpet med kemiske undersøgelser af de benyttede materialer. Desuden har firmaet 4K bidraget til projektet ved overdragelse af apparatur til måling af betons tæthed over for vand.

Der rettes også en tak til Lemvigh Müllers Fond for hjælp til den endelige færdiggørelse af projektet.

Smørum, Juli 1990

Søren Hedegård

1 INDHOLDSFORTEGNELSE

0	FORORD	1
1	INDHOLDSFORTEGNELSE	2
2	ABSTRACTS	7
2.1	Sammendrag på dansk samt nøgleord	7
2.2	Summary in English and keywords	9
3	INDLEDNING	11
4	PROJEKTETS FORMÅL	13
5	GENERELT OM FLYVEASKE	15
6	PROPORTIONERING AF FLYVEASKEBETON MED HENSYN TIL BEARBEJDELIGHED OG STYRKE	17
6.1	Oversigt over proportioneringsmetoder	17
6.2	Flyveaskes virkning på frisk betons bearbejdelighed	22
6.2.1	Flyveaskes virkning på frisk betons konsistens	22
6.2.2	Flyveaskes virkning på frisk betons kohæsion	25
6.2.3	Flyveaskes virkning på frisk betons vandseparation	26
6.3	Flyveaskes virkning på betons styrke	27
6.4	Opstilling af arbejdshypotese for undersøgelse af flyveaskebetoners konsistens og styrke	33
6.5	Forsøgsplan	33
6.6	Materialer	34
6.6.1	Cement og flyveaske	34
6.6.2	Tilslag	34
6.6.3	Tilsætningsstoffer	35
6.7	Proportionering og støbning	35
6.8	Forsøgsresultater	37

6.8.1	Friske betoners sammensætning og egenskaber	37
6.8.2	Hærdnede betoners styrker	37
6.9	Diskussion	37
6.9.1	Materialer	37
6.9.2	Friske betoners sammensætning og egenskaber	38
6.9.2.1	Beton uden flyveaske	38
6.9.2.2	Flyveaskebeton uden tilsætningsstoffer	39
6.9.2.3	Virkning af superplastificeringsstof	40
6.9.3	Hærdnede betoners styrkeudvikling	42
6.9.3.1	Trykstyrker	42
6.9.3.2	Cement- og flyveasketypernes indflydelse på betonernes styrkeudvikling	42
6.9.3.3	Undersøgelse af Bolomey's udvidede model uden restriktioner på de indgående konstanter	44
6.9.3.4	Undersøgelse af Bolomey's udvidede model med restriktioner på de indgående konstanter	46
6.9.3.5	Undersøgelse af flyveaskebetons styrke som funktion af betonens alder	48
6.10	Konklusion vedrørende flyveaskebetons proportionering med hensyn til bearbejdelse og styrke	50
6.10.1	Proportionering af flyveaskebeton	50
6.10.1.1	Flyveaskebetons konsistens - Lyse's lov	50
6.10.1.2	Flyveaskebetons trykstyrke - Bolomey's lov	51
6.11	Den danske betonnorms begrænsninger	53
7	KLORIDINDTRÆNGNING I FLYVEASKEBETON	54
7.1	Generelt om kloridindtrængning i beton	54
7.1.1	Korrosion af armeringsjern	54
7.1.2	Tærskelværdi for kloridionkoncentration med hensyn til initiering af armeringskorrosion	56

7.1.3	Betons tæthed over for kloridindtrængning	56
7.1.4	Flyveaskes virkning på kloridindtrængning i beton	59
7.2	Forsøgsplan	62
7.3	Materialer	63
7.3.1	Cement, flyveaske, tilslag og tilsætningsstof	63
7.3.2	Armeringsjern	64
7.3.3	Støbeforme	64
7.4	Proportionering og støbning	64
7.5	Eksperimentielle metoder	65
7.5.1	Metode til måling af initieringstiden for armeringskorrosion	65
7.5.2	Apparatur	67
7.5.3	Dataopsamling og bearbejdning	67
7.6	Eksperimentielle resultater	68
7.6.1	Initieringstider for armeringskorrosion	68
7.7	Diskussion	69
7.7.1	Materialer, samt de friske betoners egenskaber og de hærdnede betoners styrker	69
7.7.2	Initieringstider for armeringskorrosion	69
7.7.2.1	Spredningen på målte initieringstider	69
7.7.2.2	Middel-initieringstider for korrosion	70
7.7.3	Kloridtæt beton	72
7.7.4	Diffusionskoefficienter for klorid	73
7.7.4.1	Diffusion af klorid i beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske	73
7.7.4.2	Diffusion af klorid i flyveaskebeton	75

7.8	Konklusion vedrørende kloridindtrængning i beton	78
7.8.1	Initieringstid for korrosion i flyveaskebeton	78
7.8.2	Den danske betonnorms begrænsninger for tilsætning af flyveaske til beton af hensyn til armeringskorrosion	79
8	VANDINDTRÆNGNING I FLYVEASKEBETON	81
8.1	Generelt om betons permeabilitet	81
8.1.1	Betons tæthed overfor væske eller gas	81
8.1.2	Flyveaske virkning på betons permeabilitet	87
8.2	Forsøgsplan	89
8.3	Materialer, proportionering og støbning	91
8.4	Eksperimentielle metoder	91
8.4.1	Metode til måling af indtrængningsdybde for vand i beton	91
8.5	Eksperimentielle resultater	93
8.5.1	Friske betoners sammensætning og egenskaber	93
8.5.2	Hærdnede betoners trykstyrker	93
8.5.3	Indtrængningsdybder for vand	93
8.6	Diskussion	93
8.6.1	Materialer og blanderecepter for betoner til vandindtrængningsforsøg	93
8.6.2	Friske betoners egenskaber	94
8.6.3	Hærdnede betoners trykstyrker	95
8.6.4	Indtrængningsdybde for vand efter DIN 1048	95
8.6.4.1	Cementtypens indflydelse på vandindtrængningsdybden	96
8.6.4.2	Startvandlagringstidens indflydelse på vandindtrængningsdybden	97
8.6.5	Permeabilitetskoefficienter for beton over for vandindtrængning	98
8.6.5.1	Permeabilitet af beton uden flyveaske	99
8.6.5.2	Permeabilitet af flyveaskebeton	100

8.7	Konklusion vedrørende flyveaskebetoners vandtæthed	101
9	SAMLET KONKLUSION AF PROJEKTET	104
10	LITTERATURLISTE	107
11	SYMBOLFORTEGNELSE	116
12	TABELLER	119
13	FIGURER	153

2 ABSTRACTS

2.1 SAMMENDRAG PÅ DANSK

Denne afhandling er resultatet af et eksperimentelt projekt om proportionering og holdbarhed af flyveaskebeton. Der er i afhandlingen undersøgt to væsentlige parametre for betons holdbarhed, nemlig dens modstandsevne mod indtrængning af vand, målt ved en permeabilitetskoefficient, og dens modstandsevne mod indtrængning af kloridioner, målt ved en diffusionskoefficient.

Til de eksperimentelle forsøg er der anvendt almindelig Portland cement og Lavalkali Sulfatbestandig cement sammen med to forskellige flyveasker. Den ene flyveaske er udvundet ved forbrænding af polske kul, og den anden flyveaske er udvundet ved forbrænding af colombianske kul.

I rapporten er den almindelige britiske DOE-metode til proportionering af beton blevet udvidet til også at omfatte proportionering af flyveaskebeton. Udvidelsen af DOE metoden er muliggjort ved hjælp af en udvidelse af Lyse's lov for betons konsistens og en udvidelse af Bolomey's lov for hærdnet betons styrke.

Lyse's udvidede lov har følgende ordlyd:

Konsistensen af friske betonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, beror udelukkende på det frie vandindhold, mens konsistensen er uafhængig såvel af cementindhold som af flyveaskeindholdet, såfremt flyveaskeindholdet overstiger et vist minimum.

Bolomey's udvidede lov har følgende ordlyd:

Betons styrke, ved en given alder, ved en given lagringstemperatur og for givne delmaterialer, beror udelukkende på forholdet mellem mængden af frit støbevand og mængden af cement, samt på forholdet mellem mængden af frit støbevand og mængden af flyveaske.

Med den nyudviklede proportioneringsmetode er flyveaskens betydning for betons holdbarhed, underforstået dens tæthed over for vand og kloridioner, undersøgt inden for et bredt spectrum af vand/cement- og flyveaske/vand forhold.

Betoners modstandsevne over for transport af kloridioner er undersøgt ved hjælp af en elektrokemisk metode til bestemmelse af den såkaldte initieringstid. Initieringstiden er betegnelsen for den tid, der går fra et betonprøvelegeme udsættes for ydre kloridpåvirkning, indtil kloridionerne er trængt frem til indstøbte armeringsjern og har startet en korrosionsproces.

Metoden er velegnet til at sammenligne forskellige betoners indbyrdes tæthed. På grundlag af de målte initieringstider er der udregnet en diffusionskoefficient for hver af de undersøgte betoner.

Kloridforsøgene har vist, at de vigtigste faktorer for fremstilling af kloridtæt beton er valget af delmaterialer. Blandt delmaterialerne er cementtypen den altafgørende faktor, mens flyveaske type og vandlagringstid over en vis minimumsperiode er af mindre betydning.

Med hensyn til betons tæthed over for kloriddiffusion er det vigtigt at notere sig, at der kan forventes variationskoefficienter på initieringstiden på 35 procent selv for laboratoriefremstillede prøvelegemer. I forbindelse med udstøbningsfejl og inhomogeniteter i betonen, som må forventes at forekomme i praksis, kan variationskoefficienten mangedobles. Kloridundersøgelsen har desuden vist, at viden om flyveaskebetons trykstyrke ikke kan bruges til at forudsige noget som helst om betons modstandsdygtighed mod armeringskorrosion.

Betonernes modstandsevne over for transport af vand er undersøgt ved hjælp af en vesttysk metode, DIN 1028, hvor vandindtrængningsdybden måles, efter at betonen har været udsat for et standardiseret hydraulisk vandtryk. Metoden er velegnet til at sammenligne forskellige betoners indbyrdes tæthed. På grundlag af de målte indtrængningstider er der udregnet en permeabilitetskoefficient for hver af de undersøgte betoner.

Vandindtrængningsforsøgene har vist, at hverken forskelle i cementtype fra almindelig Portland cement til Lavalkali cement eller forskelle i vandlagringstid fra 28 til 56 døgn, ændrer betonernes tæthed over for vandindtrængning. Forsøgene har desuden vist, at betonens overfladehud udgør en væsentlig barriere mod vandindtrængning, men i praksis vil vandindtrængningen være bestemt af huller og udstøbningsfejl i overfladen.

Ingen af de eksperimentelle forsøg i denne rapport har kunnet verificere den danske betonnorms begrænsninger med hensyn til brug af flyveaske i armerede betonkonstruktioner.

Nøgleord: Beton. Flyveaske. Proportionering. Holdbarhed. Kloriddiffusion. Vandpermeabilitet.

2.2 SUMMARY IN ENGLISH

This dissertation presents the results of an experimental study on mix design and durability of fly ash concrete. Two important parameters in connection with the durability of concrete have been investigated i.e., the resistance to chloride penetration and the resistance to water penetration. The resistance to chloride penetration is expressed by the coefficient of chloride diffusion, and the resistance to water penetration is expressed by the coefficient of water permeability. The experiments were carried out using Ordinary Portland Cement (ASTM type I) and Lavalkali Sulphate Resistant Cement (ASTM Type V) together with two different types of fly ash. The first fly ash originated from the burning of Polish coal and second fly ash from the burning of Columbian coal.

The British DOE-Method for "Design of Normal Concrete Mixes" has been extended to include mix design of fly ash concrete. This extension has become possible by an extension of Lyse's rule for the consistency of concrete, and an extension of Bolomey's law for the strength of concrete.

Lyse's modified rule can be expressed as follows:

The consistency of fresh concretes, produced with identical raw materials, depends only on the effective water content, and the consistency is independence of the cement content and the fly ash content, provided the fly ash content exceeds a certain minimum.

Bolomey's modified law can be expressed as follows:

The strength of concrete at a certain age, at a certain curing temperature and for identical raw materials, depends only on the ratio between the amount of free water and the amount of cement, and the ratio between the amount of free water and the amount of fly ash.

The new mix design method was used in the investigation of the influence of fly ash on the durability of concrete with regard to its resistance towards penetration of water and chloride.

Resistance of concrete against penetration of chloride ions was investigated by means of an electrochemical method which determines the so-called initiation period. The initiation period is defined as the time from concrete specimens are first exposed to chloride until the aggressive chloride ions have reached reinforcement steel embedded in the concrete and started corrosion. This method is particularly useful for comparing the chloride resistance of different concrete qualities. The coefficient of diffusion is calculated for each of the investigated concretes, based on the measured time to onset of the corrosion.

The chloride investigation has shown that the raw materials used to produce the concrete are very important. Among the raw materials the type of cement is the overall dominant factor, while the type of fly ash and curing time exceeding a certain minimum is of less importance.

With regard to chloride diffusion it is important to realize that concrete which is produced without defects may have a statistical coefficient of variation in time to onset the corrosion of 35 percent. This variation in the time to onset the corrosion may be several times larger in real production of concrete where defects are unavoidable. The chloride investigation has also shown that knowledge of the strength of a fly ash concrete is of no use in predicting the resistance against corrosion of steel in the same concrete.

Resistance of concrete towards penetration of water was investigated by means of a German standard method, DIN 1028. With this method the penetration depth of water is determined after standardized concrete specimens have been exposed to a standardized hydraulic pressure. The German method is useful for comparing watertightness of different concrete qualities. The coefficient of permeability is calculated for each of the concretes studied, based on the measured water penetration depth.

The investigation has shown that a change from Ordinary Portland Cement to Low Alkali Sulphate Resistant Cement does not significant alter the penetration depth; nor does a change in curing time from 28 days to 56 days. The investigation has also shown that the concrete skin makes an important barrier against water penetration. However, in practise the penetration of water in concrete will be determined by voids and defects in the concrete surface.

The results of this investigation indicated that the current limitations in the national Danish concrete code with regard to the use of fly ash in reinforced concrete are not justified and should be modified.

Keywords: Concrete. Fly ash. Mix Design. Durability. Chlorid Diffusion. Water Permeability.

3 INDLEDNING

Beton er et industrielt fremstillet byggemateriale, der består af sten, som er indlejrede i, og sammenkittede af en hærtnet masse, kaldet en mørtel. Mørtlen består af en blanding af et hydraulisk bindemiddel samt sand og vand.

Et hydraulisk bindemiddel er en lim, som kan hærde både i luft og under vand; men altid ved reaktion med vand. Ved en hydraulisk reaktion dannes et produkt, som er uopløseligt i vand. Det hydrauliske bindemiddel, der hyppigst bruges i praksis, kaldes Portland cement. Det er et industrielt fremstillet produkt, som produceres ved sammensætning af en intim blanding af fint-formalet kalk og ler eller lignende silikatholdige råmaterialer i en rotérovn ved ca. 1500°C.

Beton er ikke noget nyt byggemateriale. Det er først beskrevet i litteraturen af den romerske arkitekt Vitruvius [1], som virkede på kejser Augustus' tid. Den kemiske sammensætning af reaktionsprodukterne i romersk beton er stort set de samme som i moderne beton, men der blev brugt andre råmaterialer. Bindemidlet i romersk beton bestod ikke af Portland cement, men af et såkaldt pozzolan i form af fint formalet tegl eller vulkansk aske, som man for eksempel hentede fra byen Pozzuoli, der ligger nær Vesuvbjerg. Navnet på denne by har givet anledning til fællesbetegnelsen pozzolan for en lang række finkornige og silikatholdige råmaterialer, der i sig selv ikke reagerer med vand, men som danner et bindemiddel ved reaktion med brændt eller læsket kalk og vand. American Concrete Institute [2] definerer således et pozzolan på følgende måde:

"A siliceous or siliceous and aluminous material, which in itself possesses little or no cementitious value but will, in finely divided form and in the presence of moisture, chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds possessing cementitious properties."

Pozzolaner kan med fordel blandes med Portland cement. Brugen af pozzolan i beton er taget til i de senere år, da der er kommet store mængder flyveaske på markedet efter store prisstigninger på olie i halvfjerdsene, der resulterede i en omlægning af energiforsyningen fra olie til kul i store dele af verden. Flyveaske er et restprodukt fra kulfyrede varme- og kraftværker. Flyveaske defineres i følge American Concrete Institute på følgende måde:

"The finely divided residue resulting from the combustion of ground or powdered coal which is transported from the firebox through the boiler by flue gases."

Flyveaske er et pozzolan, og det har været kendt siden før anden verdenskrig, at man i mange tilfælde med fordel kan sætte flyveaske til Portland cementbeton. Det var imidlertid først i midten af halvfjerdsene, man begyndte at bruge flyveaske i Danmark. Siden er udviklingen gået stærkt.

Tidligere sammensatte man delmaterialerne til beton, således at man opnåede god bearbejdelse af den friske beton og tilfredsstillende styrke hos den hærtnede beton. Betonens holdbarhed skænkede man ikke mange tanker. Det er først efter, at der i de sidste årtier er konstateret alvorlige skader selv på nyere konstruktioner, at man er blevet klar over, at tilfredsstillende tidlig styrke ikke nødvendigvis er ensbetydende med tilfredsstillende holdbarhed af beton.

I to omgange er de danske betonnormer og bestemmelser derfor blevet strammet op [3] og [4]. Samtidig er brug af flyveaske i beton blevet accepteret [5], og der er indført grænser for, hvor meget flyveaske der må bruges i danske betonkonstruktioner.

På grund af manglende basisviden om flyveaskens virkning på betons egenskaber har det imidlertid været vanskeligt at opstille sådanne optimale krav, som er nødvendige og tilstrækkelige til at sikre fremstilling af god beton, samtidig med at der opnås bedst mulig økonomisk udnyttelse af flyveasken. Det er nogle af disse forhold, som forfatteren af denne afhandling ønsker at råde bod på.

4 PROJEKTETS FORMÅL

I det eksperimentelle projekt, som beskrives i denne rapport, har forfatteren forsøgt at udvide forståelsen for flyveaske indvirkning på to væsentlige parametre for betonens holdbarhed, nemlig dens modstandsevne mod indtrængning af vand, målt ved en permeabilitetskoefficient, og dens modstandsevne mod indtrængning af kloridioner, målt ved en diffusionskoefficient.

Før der kunne gennemføres en systematisk undersøgelse af flyveaskebetoners tæthed, måtte der imidlertid udvikles en rationel proportioneringsmetode for styrke og bearbejdelighed af sådanne betoner. Dette viste sig at være både tidsrøvende og vanskeligt. Disse problemer behandles i rapportens kapitel 6.

Både permeabilitets- og diffusionskoefficienter er såkaldte transportkoefficienter, som indgår i almindelige fysiske love for transportfænomener i faste stoffer. Således defineres permeabilitetskoefficienter på grundlag af Darcy's lov for væsketransport i porøse stoffer, som skyldes hydrauliske trykforskelle, medens diffusionskoefficienter defineres på grundlag af Fick's første og anden lov for diffusion, d.v.s. for transport af atomer, molekyler eller ioner i faste stoffer, som skyldes ydre eller indre koncentrationsforskelle.

Hvis modstandsevnen mod indtrængning af skadelige stoffer skal kunne bruges som mål på betonens holdbarhed, bør den måles ved hjælp af prøvemethoder, der på bedst mulig måde simulerer det miljø, som betonen udsættes for i praksis. Det har ikke altid været tilfældet i tidligere undersøgelser.

I kapitel 7 bestemmes og sammenlignes betoners modstandsevne overfor transport af kloridioner ved hjælp af en elektrokemisk målemetode. Ved metoden registreres den tid, det tager for kloridioner at trænge gennem en armeret betons dæklag. I kapitel 8 sammenlignes forskellige flyveaskebetoners permeabilitet ved hjælp af en praktisk og enkel prøvemetode, der bygger på Darcy's lov for endimensional vandtransport, forårsaget af en hydraulisk trykforskel mellem to sider af samme betonprøvelegeme.

Da de fleste skader på beton skyldes manglende tæthed af betonen, håber forfatteren, at disse undersøgelser kan bidrage til at verificere eller justere den danske betonnorms regler for anvendelse af flyveaske i beton.

Af holdbarhedsmæssige grunde tillader den danske betonnorm DS 411.84 nemlig kun brug af flyveaske i en mængde, der svarer til 35 vægtprocent af den samlede mængde cement og flyveaske. Efter forfatterens mening er denne begrænsning af flyveaskemængden i beton ikke tilstrækkelig videnskabeligt underbygget. Desuden stiller normen, ligeledes af holdbarhedsmæssige grunde, de i tabel 4.1 angivne krav til betonens maksimalt tilladelige vand/cement forhold, v/c , og krav til mindste tilladelige værdier for betons karakteristiske trykstyrke, f_{ck} , beroende på den foreskrevne miljøklasse.

Det fremgår imidlertid ikke af selve normen, hvorledes flyveaske kan medregnes ved beregning af betons vand/cement forhold eller ved vurdering af betons tæthed, underforstået betons holdbarhed.

Det fremgår imidlertid af en senere udgivet vejledning til normen [5], at man ved kontrol af betonens vand/cement forhold kan medregne flyveaskemængden ved hjælp af en såkaldt aktivitetsfaktor for betons tæthed, k_d , som angiver hvor mange kg flyveaske, der kan erstatte 1 kg cement, såfremt betonen skal bibeholde uforandret tæthed, underforstået holdbarhed. Ved bedømmelse af flyveaskebetons tæthed foreskriver anvisningen således, at man skal bruge et ækvivalent vand/cement forhold $\left(\frac{v}{c}\right)_{\text{ækvivalent}}$, som defineret i ligning (4.1).

$$\left(\frac{v}{c}\right)_{\text{ækvivalent}} = \frac{v}{c + k_d \cdot f} \quad (4.1)$$

hvor v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)
 c = betonens cementindhold, (kg/m³)
 f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)
 k_d = flyveaskens aktivitetsfaktor for tæthed

Abitrært og uden egentlig videnskabelig baggrund foreskriver anvisningen [5], at man skal bruge en fast værdi for k_d på 0.5 ved beregning og kontrol af betons vand/cement forhold, uanset hvilken flyveaske betonen fremstilles med. Denne foreskrift er utilfredsstillende dokumenteret.

Et af de væsentligste formål med dette projekt er at undersøge, hvorvidt normens begrænsninger med hensyn til brug af flyveaske er berettigede, eller om de eventuelt bør skærpes eller lempes.

Som tidligere nævnt, måtte der imidlertid udvikles en rationel proportioneringsmetode for flyveaskebeton med hensyn til styrke og bearbejdelse, før der kunne gennemføres en systematisk undersøgelse af sådanne betoners tæthed.

Projektet og rapporten falder derfor naturligt i fire dele:

- 1) Proportionering af flyveaskebeton med hensyn til:
 - a) Bearbejdelse
 - b) Trykstyrke

Denne del af undersøgelsen er beskrevet i kapitel 6.

- 2) Tæthed af flyveaskebeton med hensyn til:
 - a) Kloridindtrængning
 - b) Vandindtrængning

Denne del af undersøgelsen er beskrevet i kapitlerne 7 og 8.

Til den foreliggende hovedrapport hører en bilagsrapport, Programdokumentation, som blandt andet indeholder de EDB-programmer, der er benyttet ved analyse af de i projektet opnåede resultater, samt programmer til udskrivning af tabeller og tegning af figurer.

5 GENERELT OM FLYVEASKE

Flyveaske er et restprodukt, som dannes ved forbrænding af kul i kraft- og varmeværker. For at mindske forureningen af det omgivende miljø, udskilles forbrændingsprodukterne fra røggasserne i elektrostatiske filtre, før gasserne ledes ud i atmosfæren.

Flyveaskens struktur og sammensætning er hovedsageligt bestemt af den benyttede kultype og styringen af forbrændingsprocessen; men opsamlingsystemets udformning er også af betydning for kvaliteten af slutproduktet. Flyveaske består af små glasagtige og faste, runde, men hule partikler med en diameter på mellem 1 µm og flere hundrede µm. Den kemiske sammensætning af typiske flyveasker fra danske kraftværker, er vist i tabel 5.1.

I henhold til ASTM C 618 inddeles flyveaske i to klasser, C og F. Til klasse C hører flyveasker med stort indhold af kalciumoxid, der hidrører fra forbrændingen af brunkul. Til klasse F hører typiske danske flyveasker med et forholdsvis lille indhold af kalciumoxid, der hidrører fra forbrænding af stenkul. Flyveaske er altså ikke et ensartet produkt som Portland cement, og anvendelsen af flyveaske i beton bør indrettes derefter.

Der er flere grunde til at blande flyveaske i beton:

- 1) Bidrag til løsning af samfundsmæssige affalds- og miljøproblemer.
- 2) Forbedret økonomi ved betonfremstilling.
- 3) Forbedrede betonegenskaber.

Ad 1) Som nævnt er flyveaske et affaldsprodukt fra forbrænding af kul. I forbindelse med omlægningen af energiforbruget fra olie til kul i halvfjerdsernes Danmark og i forbindelse med kravet om stadig mere effektiv rensning af røggasser, er produktionen af flyveaske steget stærkt i løbet af de sidste tyve år. Overskudsflyveaske skal imidlertid deponeres i særligt indrettede affaldsdepoter. Denne deponering er problemfyldt, både set fra økonomiske og miljømæssige synspunkter. Ved deponering af flyveaske må det f.eks. sikres, at nedsivning af overfladevand ikke giver anledning til forurening af grundvand på grund af flyveaskens indhold af tungmetaller. Set fra et miljømæssigt synspunkt, er det derfor ønskeligt at kunne bruge så store mængder flyveaske som muligt til betonfremstilling. Betonen binder nemlig tungmetallerne.

Ad 2) Fremstilling af cement er meget energikrævende. Da flyveaske har pozzolan-egenskaber, kan flyveaske erstatte en del af Portland cementen i beton. Erstatningen kan enten ske på cementfabrikken eller hos betonproducenten. Derved kan omkostningerne ved betonfremstillingen reduceres. Flyveaske kan også bruges i stedet for ler som råmateriale ved selve cementfremstillingen i rotérovnen.

Ad 3) Den friske betons bearbejdelighed og den hærtnede betons styrke og holdbarhed kan forbedres ved tilsætning af flyveaske.

Når der bruges flyveaske til fremstilling af beton, påvirkes alle betonens egenskaber. I frisk beton virker flyveasken som fint tilslag. Desuden reducerer kvalitetsmæssigt tilfredsstillende flyveaske altid betons vandbehov. I hærtnet beton bidrager flyveaske desuden til betonens styrke og holdbarhed på grund af pozzolanreaktion.

Flyveaske kan, som nævnt, enten indblandes direkte i Portland cement på cementfabrikken, eller den kan tilsættes betonen sammen med Portland cement, vand og tilslag på betonfabrikken.

Der er flere fordele ved at blande flyveaske i cementen på cementfabrikken. For det første opnås der på landsplan et stort forbrug af flyveaske, og for det andet opnås god styring af tilsætning og derved fremstilling af et ensartet produkt. Ved denne fremgangsmåde opstår der ingen væsentlige problemer hos betonproducenten, fordi almindelige metoder til proportionering af beton fortsat kan benyttes.

Hvis flyveasken derimod tilsættes i forbindelse med selve betonproduktionen, opnås en større fleksibilitet i betonproduktionen med mulighed for endnu bedre og mere intensiv udnyttelse af flyveasken. Ulempen ved denne fremgangsmåde er imidlertid, at traditionelle proportioneringsmetoder for beton ikke umiddelbart kan anvendes. Der må udvikles nye eller modificerede proportioneringsmetoder, som tager hensyn til flyveaskens indvirkning på betonens egenskaber.

I Danmark har man, forhåbentlig med rette, valgt at blande flyveaske i cementen, og som det eneste land i verden er vi i den situation, at almindelig Portlandcement, svarende til ASTM type I, ikke længere kan leveres. Den almindelige Portland cement er omdøbt til Standard cement, og den kan i princip indeholde op til 35% flyveaske. Som regel indeholder Standard cement 22-24% flyveaske regnet i vægtprocent af den samlede mængde cement plus flyveaske. Altså lidt mindre end den største mængde, som betonnormen tillader.

Der er i tidens løb udført mange undersøgelser af flyveaskes virkning på betons egenskaber. Hovedresultaterne er samlet i en række udmærkede oversigtsrapporter. Blandt disse bør nævnes:

- Abdun-Nur, 1961 [6]
- Snyder, 1962 [7]
- Kokubu, 1969 [8]
- Jarriage, 1971 [9]
- Berry and Malhotra, 1978 [10]
- Berry and Malhotra, 1980 [11]
- Berry and Malhotra, 1986 [12]
- Malhotra (editor), 1986 [100]
- Helmuth, 1987 [13]
- ACI Committee Report 226.3R, 1987 [14]

Resultaterne af mange af disse undersøgelser er imidlertid, som det påpeges af Helmuth [15], vanskelige at vurdere og sammenligne i praksis, fordi der er brugt forskellige metoder til proportionering af betonerne.

Før der kan foretages en vurdering af flyveaskers virkning på beton, er det derfor væsentligt at forstå særegenhederne ved de mest almindeligt anvendte proportioneringsmetoder for flyveaskebeton. Disse metoder er beskrevet i kapitel 6.1.

6 PROPORTIONERING AF FLYVEASKEBETON MED HENSYN TIL BEARBEJDELIGHED OG STYRKE

6.1 OVERSIGT OVER PROPORTIONERINGSMETODER

Formålet med al betonproportionering er at fastlægge sådanne relative mængder af de indgående delmaterialer, at både den friske og den hærdnede beton opnår de ønskede egenskaber på den mest økonomiske måde.

Proportionering af almindelig beton er en forholdsvis enkelt sag. Der findes ganske vist mange forskellige metoder til at proportionere beton, men i deres grundlæggende principper ligner alle metoderne hinanden. Først skønnes betonens vandbehov på grundlag af erfaringsværdier, således at betonen opnår den ønskede konsistens. Derefter skønnes et vand/cement forhold, ligeledes på grundlag af erfaringsværdier, således at betonen opnår den ønskede trykstyrke, og endelig skønnes en sandprocent, således at betonen opnår tilfredsstillende kohæsion og økonomi. Til sidst beregnes vægtmængderne af de forskellige delmaterialer per kubikmeter beton ved hjælp af simpel forholdsregning.

Hvis man bruger proportioneringsmetoder for almindelig beton i forbindelse med flyveaskebeton, opstår der imidlertid problemer. Tilsætning af flyveaske ændrer nemlig både den friske betons vandbehov og den hærdnede betons styrkeudvikling.

I tidens løb har mange forskere søgt at løse disse problemer på forskellige måder, og det er vanskeligt at sammenligne de forskellige metoder. Proportioneringsmetoderne for flyveaskebeton kan groft inddeles i tre kategorier:

- 1) Simple erstatningsmetoder
- 2) Modificerede erstatningsmetoder.
- 3) Rationelle metoder.

Ad 1) Simple erstatningsmetoder blev især benyttet i de tidligste undersøgelser. Det er karakteristisk for disse metoder, at en vis volumen- eller vægtmængde cement erstattes med en tilsvarende mængde flyveaske. Simpel erstatning af cement med flyveaske medfører altid langsommere styrkeudvikling og lavere slutstyrke for betonen. Desuden taber man kontrollen med betonens bearbejdelighed. Derfor er man gået bort fra disse metoder.

I forbindelse med visse simple erstatningsmetoder, benyttes flyveaske som erstatning for det fine tilslag i betonen, medens cementindholdet bibeholdes uforandret. Ved en sådan delvis substitution af det fine tilslag med flyveaske opnår betonen højere styrker på alle tidspunkter efter fremstillingen, men man har stadig ingen effektiv kontrol med betonens bearbejdelighed.

Ad 2) Ved de modificerede erstatningsmetoder tilsætter man en større mængde flyveaske, end den cementmængde der fjernes, således at betonens trykstyrke bibeholdes. Ved hjælp af prøveblandinger justeres vandtilsætning og sandprocent, således at betonens konsistens og

kohæsion bibeholdes. Disse metoder er imidlertid også for unøjagtige til moderne betonproduktion, og man har efterhånden forladt de modificerede erstatningsmetoder til fordel for en tredje generation af mere rationelle proportioneringsmetoder.

Ad 3) Tredie generation af proportioneringsmetoder for flyveaskebeton, såkaldte rationelle metoder, er karakteriserede ved, at de i højere grad end erstatningsmetoderne tager hensyn til flyveaskens specielle egenskaber. Grundlaget for disse metoder blev lagt af Smith [16] i 1967. Smith benytter som grundlæggende princip en såkaldt aktivitetsfaktor k_s for styrke, der angiver reaktionsevnen af flyveasken i forhold til cementens reaktionsevne. I henhold til Smith's metode kan betonens trykstyrke ved en given alder beregnes ved ligning 6.1.

$$f_c = A \left(\frac{c + k_s \cdot f}{v} \right) + E \quad (6.1)$$

hvor f_c = trykstyrke af flyveaskebeton, (MPa)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³).

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

k_s = aktivitetsfaktor for styrke

A og E = konstanter, der afhænger af cementtypen og betonens alder.

Det bemærkes, at ligning 6.1 beskriver en modificeret form for den velkendte vand/cementtals lov, der oprindeligt er formuleret i 1927 af Bolomey [17] for almindelig beton, og som er gengivet i ligning 6.2

$$f_{alm} = A \frac{c}{v} + E \quad (6.2)$$

hvor f_{alm} = almindelig betons trykstyrke uden tilsætning af flyveaske, (MPa)

Smith antog desuden, at flyveaskebeton og almindelig beton opnår samme bearbejdelighed, hvis de to følgende krav er opfyldte:

$$\left(\frac{c+f}{v} \right)_{\text{volumen}} = \text{konstant} \quad (6.3)$$

$$\left(\frac{c+f+v}{T} \right)_{\text{volumen}} = \text{konstant} \quad (6.4)$$

hvor $T =$ betonens indhold af tilslag, (kg/m^3)

Præsentationen af Smith's metode i 1967 gav anledning til et gennembrud for proportionering af flyveaskebeton, men metoden er behæftet med en række svagheder. For det første er aktivitetsfaktoren k_s i ligning 6.1 ikke, som antaget af Smith, konstant for en og samme flyveaske. Aktivitetsfaktoren afhænger både af betonens lagringsforhold, lagringstiden og det aktuelle styrkeniveau, som betonen proportioneres for. Desuden er Smith's metode uoverskuelig og vanskelig at bruge i praksis, især på grund af kravet i ligning 6.4.

Ghosh [18], Rosner [19], Owens [20], Hobbs [21], Popovics [22] og Cannon [23] har derfor i tidens løb udviklet andre proportioneringsmetoder, der dog aldrig er slået igennem, antagelig fordi de alle bygger på modificering af sammensætningen af en udgangsbeton, som fremstilles uden flyveaske. Allerede Smith [16] påpegede, at flyveaskebeton ikke bør sammenlignes med, eller henføres til en udgangsbeton uden flyveaske. Flyveaskebeton bør i stedet betragtes som en ny type beton og proportioneres som sådan.

En nyere metode, som er foreslået af Munday og Dhir [24], er netop opbygget efter dette princip. Deres metode er ikke relateret til en udgangsbeton uden flyveaske. Det vigtigste ved metoden er, at både betonstyrke, vandbehov og optimal flyveaskemængde findes ved hjælp af erfaringsværdier. Den optimale flyveaskemasse for et givet forhold mellem styrke og vand/cement forhold findes ved hjælp af figur 6.1, som stammer fra Munday og Dhirs publikation [24]. Denne erfaringskurve kan imidlertid udtrykkes ved hjælp af ligning 6.5.

$$\frac{v}{c} = 0.38 + 0.546 \frac{f}{c} \quad (6.5)$$

Ved omskrivning af ligning 6.5 fås ligning 6.6

$$\frac{v}{c + 1.43 \cdot f} = 0.38 = \frac{v}{c + (d_c/d_f) \cdot f} \quad (6.6)$$

Munday og Dhir synes ikke at have bemærket, at konstanten 1.43 svarer til forholdet mellem en typisk densitet $d_c = 3100 \text{ kg/m}^3$ for almindelig Portland cement og en typisk densitet $d_f = 2160 \text{ kg/m}^3$ for flyveaske. Det vil med andre ord sige, at Smith's ligning 6.3 og Munday og Dhir's diagram i figur 6.1 i princip udtrykker samme krav til flyveaskebetons volumetriske sammensætning. Ved at gange vægtmængden flyveaske i beton med faktoren 1.43 omregner man i praksis vægtmængden flyveaske til en ækvivalent vægtmængde cement på volumenbasis.

Munday og Dhir [24] synes heller ikke at hæfte sig ved, at tallet 0.38 på højre side af lighedstegnet i ligning 6.6 angiver det omtrentligt mindste frie vand/cement forhold, ved hvilket almindelig beton kan udstøbes og vibreres uden tilsætning af plastificeringsstoffer. Ved lavere vand/cement forhold bliver betonen ofte så klæg, at den kun med vanskelighed kan udstøbes og vibreres.

Hvis v og c er kendte størrelser, kan den størst mulige mængde flyveaske, f , hvormed beton kan fremstilles og komprimeres uden at blive kohæsiv og klæg beregnes på grundlag af ligning 6.6, se Hedegård [25]. På grundlag af omfattende forsøg har Hedegård [25] dog tidligere foreslået, at konstanten på højre side af ligning 6.6 passende kan sættes til 0.35 for beton uden plastificeringsstoffer og fremstillet med Hvid Portland cement, i stedet for 0.38. Denne forskel er imidlertid ubetydelig, set fra et praktisk synspunkt. Hvis der bruges plastificeringsstoffer, kan tallet på højre side af ligningen reduceres betydeligt, men derom senere.

Det bemærkes endvidere, at Munday og Dhir's metode ikke direkte tager hensyn til, at flyveaske virker som fint tilslag, og at betons sandprocent derfor bør reduceres, når der tilsættes flyveaske. Desuden er det tvivlsomt, om betonstyrken kan fastlægges ved hjælp af en og samme erfaringskurve uanset flyveaske- og cementtype, således som det antages af Monday og Dhir.

I store dele af den engelsktalende verden, med undtagelse af U.S.A. og Canada, proportioneres almindelig beton i princip på grundlag af en gammel engelsk publikation, som populært kaldes "Road No. 4" [26]. I sin nyeste udgave er Road No. 4 omdøbt til "Design of Normal Concrete Mixes" [27], populært kaldet DOE-metoden efter den britiske organisation "Department of the Environment", som har udviklet metoden.

Ved DTH's Laboratorium for Bygningmateriale foregår al proportionering af almindelig beton på grundlag af en tillempet DOE-metode, se Hansen [28]. På grundlag af omfattende forsøg, som er udført af Narud [29] og Hedegård [25], er denne proportioneringsmetode modificeret af Hansen og Hedegård [30] til også at omfatte flyveaskebeton. Kort resumeret kan metoden opdeles i følgende trin:

- 1) Betonens nødvendige proportioneringsstyrke beregnes på grundlag af den krævede karakteristiske styrke.
- 2) Delmaterialerne udvælges og tilslagets gradering, vandabsorptionsevne og vandindhold bestemmes.
- 3) De nødvendige vand/cement- og flyveaske/vand forhold bestemmes ved hjælp af ligningerne 6.7 og 6.8 (se afsnit 6.10.1.2 og ligning (6.6) med tilhørende kommentarer)

$$f_c = A \frac{c}{v} + B \frac{f}{v} + D \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E \quad (6.7)$$

$$\frac{v}{c + (d_c/d_f) \cdot f} = 0.35 \quad (6.8)$$

hvor konstanterne A og E er kendte fra Bolomey's lov for beton som fremstilles med den givne cement, medens B og D bestemmes i forbindelse med fremstilling og prøvning af mindst to prøveblandinger af flyveaskebeton. Størrelserne d_c og d_f er cementens henholdsvis flyveaskens korndensiteter (kg/m^3).

- 4) Betonens vandindhold skønnes på grundlag af krav til betonens konsistens, i første omgang på grundlag af eksisterende eksperimentelt bestemte tabelværdier, som f.eks. tabel 6.1. Som ved fremstilling af beton med luftindblanding vælges dog det næstlavere konsistensniveau i forhold til det ønskede. D.v.s. at man rykker en kolonne til venstre i tabellen.
- 5) Betonens optimale sandprocent skønnes med hensyn til optimal betonkohæsion og økonomi, ligeledes på grundlag af eksisterende eksperimentelle værdier, figur 6.2, hvor der benyttes følgende indgangsparametre:
 - A. Max. stenstørrelse
 - B. Betonens konsistens (sætmål eller vebe)
 - C. Sandets graderingszone (BS 882; part 2;1973)
 - D. Den numeriske værdi af forholdet $\frac{v}{c + (d_c/d_f) \cdot f}$ i stedet for den numeriske værdi af $\frac{v}{f}$ hvor d_c og d_f er henholdsvis cementens og flyveaskens korndensiteter.
- 6) Densiteten af den friske beton beregnes, hvorefter betonens indhold af sand og sten findes ved simpel forholdsregning.
- 7) Den aktuelle mængde tilslag og blandevand beregnes og justeres for tilslagets absorptionsevne og vandindhold.
- 8) Der fremstilles mindst to prøveblandinger med forskellige styrkeniveauer, og betonrecepten justeres på grundlag af de opnåede bearbejdeligheder og styrker for blandingerne.

Principperne i denne proportioneringsmetode benyttes ved proportionering af alle flyveaskebetoner, der er studeret i den foreliggende undersøgelse. Desuden er der medtaget en del resultater fra Hedegård's [25] tidligere forsøg, således at der kan foretages en samlet undersøgelse og vurdering af spørgsmålet, om den foreslåede metode er generelt brugbar til proportionering af flyveaskebeton.

6.2 FLYVEASKES VIRKNING PÅ FRISK BETONS BEARBEJDELIGHED

Frisk betons "bearbejdelighed" er et vidt begreb. I princip burde betons bearbejdelighed måles ved den energimængde, der er nødvendig for fuldstændigt at komprimere betonen, d.v.s. for at drive al luften ud af betonen og bringe den friske beton til fuldstændigt at udfylde formene og helt at omslutte alle armeringsjern.

Frisk betons bearbejdelighed beror dels på betonens konsistens, d.v.s. den lethed hvormed betonen flyder. (Konsistensen måles typisk ved sætmålet, vebemålet eller udbredelsesmålet). Dels beror den friske betons bearbejdelighed på betonens kohæsion, d.v.s. på betonens evne til at holde sammen på delmaterialerne, således at man undgår, at større sten skiller sig ud fra mørtelen. Betonen må dog ikke blive for kohæsiv, da den så bliver klæg og vanskelig at bearbejde. Den friske betons kohæsion bedømmes som regel visuelt. Dette er utilfredsstillende, men der findes ingen standardiserede målemetoder for kohæsion af beton.

6.2.1 Flyveaskes virkning på frisk betons konsistens.

Ved fremstilling af al beton er det væsentligt, at man kan styre den friske betons konsistens. For almindelig beton, altså beton som fremstilles uden flyveaske, er konsistensen af den friske beton udelukkende bestemt af det frie vandindhold i blandingen, som udtrykt ved Lyse's lov, der har følgende ordlyd:

"Konsistensen af friske betonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, beror udelukkende på det effektive vandindhold, mens konsistensen er uafhængig af cementindholdet".

Når der sættes flyveaske til beton, ændres den friske betons konsistens, men ingen har endnu været i stand til at beregne eller forklare denne ændring på helt tilfredsstillende måde.

I de fleste undersøgelser vedrørende flyveaskes virkning på frisk betons konsistens har man fundet, at flyveaske forbedrer betons konsistens. Det vil sige, at flyveaske nedsætter det nødvendige frie vandindhold for opretholdelse af samme konsistens hos betonen. Den typiske vandreduktion for bibeholdt betonkonsistens ligger omkring 5-10%.

Resultatet af enkelte undersøgelser viser imidlertid, at tilsætning af visse typer af flyveaske til beton kan reducere betonens konsistens og således give anledning til krav om tilsætning af større mængder vand, for at man skal kunne opretholde samme betonkonsistens. Sådanne flyveasker er uegnede til betonfremstilling, og de vil ikke blive behandlet i den foreliggende rapport.

Størrelsen af flyveaskes virkning på betons konsistens afhænger både af flyveasketype, flyveaskemængde, og af den proportioneringsmetode der benyttes. Dette fremgår af nedenstående eksempler:

Carette og Malhotra [31] har med en **simpel erstatningsmetode**, hvor masseforholdet mellem vand/(cement + flyveaske) holdes konstant, undersøgt elleve forskellige flyveaskers virkning på betons konsistens. De fandt, at to af de elleve flyveasker reducerede den friske betons konsistens, mens de øvrige ni flyveasker forøgede konsistensen, målt ved betonens sætmål.

Pasko [32] fandt med en **modificeret proportioneringsmetode**, hvor 20 vægtprocent af cementen blev erstattet med 30 vægtprocent flyveaske, at betonernes vandbehov blev reduceret med ca. 7%.

Naik [33] har ligeledes benyttet en **modificeret proportioneringsmetode** med cementerstatninger mellem 20% og 60%. Naik fandt, at betonernes frie vandindhold kunne reduceres med 4-8% ved cementerstatninger mellem 20% og 50%. Ved en cementerstatning på 60% fandt Naik, at betonernes vandbehov kunne reduceres med hele 18%.

Gopalan [34], der har udviklet en **rational proportioneringsmetode**, fandt, at den vandreduktion (P), der opnås ved at sætte flyveaske til beton, kan beregnes ved hjælp af følgende tredjegrads ligning:

$$P = 10.2\left(\frac{f}{c}\right) - 2.6\left(\frac{f}{c}\right)^2 + 0.23\left(\frac{f}{c}\right)^3 \quad (6.9)$$

hvor f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)
 c = betonens cementindhold, (kg/m³)

Den reduktion i betonernes vandbehov, som konstateredes af Gopalan, er vist i figur 6.3.

Disse eksempler illustrerer den uklarhed, der endnu eksisterer vedrørende flyveaskes virkning på frisk betons konsistens. Den generelle opfattelse er imidlertid, at tilsætning af flyveaske til beton væsentligt forbedrer betons konsistens. De særlige flyveasker, som af en eller anden grund forøger betons vandbehov, bør ikke bruges til betonfremstilling i praksis. Sådant misbrug kan evt. forhindres ved at opstille relevante normkrav til flyveaskes plastificerende virkning i lighed med, hvad der er tilfældet for plastificerende kemiske tilsætningsstoffer.

Adskillige undersøgelser, bl.a. Owens [35], har vist, at den vigtigste egenskab ved flyveaske med hensyn til dens virkning på betons konsistens, er askens andel af korn større end 45µm. Den virkning af flyveaskens kornstørrelse på betons vandbehov, som Owens fandt i sin undersøgelse, er vist i figur 6.4. Det fremgår desuden af figur 6.4, at reduktionen i betonens vandbehov også afhænger af mængden tilsat flyveaske i forhold til mængden cement i betonen.

I en tidligere undersøgelse ved LBM, som blev udført af Hedegård [25], er det foreslået, at flyveaskes virkning på frisk betons konsistens kan forklares ud fra rene geometriske betragtninger vedrørende hulrumsvoluminerne ved pakning af ensartede kugler. Ved tilsætning af små mængder flyveaske, hvis korn er af samme størrelsesorden som cementkornene, reduceres betonens vandbehov, fordi cementen og flyveasken tilsammen udfylder sådanne hulrum mellem sandpartiklerne i mørtlen, som ellers ville være vandfyldte. Denne reduktion i betonens vandbehov ophører, når den samlede mængde cement og flyveaske overstiger, hvad der er plads til i hulrummene mellem sandkornene i mørtlen. Tilsætning af yderligere mængder flyveaske

medfører, at der opstår et overskud af partikler i cement-flyveaskestørrelsen. Dette bevirker, at sandpartiklerne skubbes fra hinanden, hvorved hulrumsprocenten og dermed betonens vandbehov forøges. At hulrumsprocenten stiger kan forklares ved, at hulrumsvoluminer ved pakning af to tilslagstyper med forskellige middeldiametre altid er mindst ved et ganske bestemt blandingsforhold mellem de to tilslag, mens hulrumsvoluminerne forøges, hvis der tilsættes mere eller mindre af et af de to typer tilslag. Det antages derfor, at tilsætning af store mængder flyveaske til beton vil medføre, at hulrumsvoluminet i mørtlen forøges. Dette skulle bevirke stigende vandbehov hos flyveaskebeton med øgende flyveaskemængder over en vis størrelse.

Flyveaskes virkning på frisk betons konsistens kan også forklares ud fra rene geometriske og mekaniske betragtninger vedrørende pakning af ensartede kugler, den såkaldte "kuglelejeeffekt". Flyveaskens forbedrende virkning på den friske betons bearbejdelse kan sammenlignes med den forbedrede bevægelighed, der opnås mellem to plane flader af et fast stof (tilslagspartiklerne i beton), når der blot placeres nogle enkelte små kugler (flyveaskepartikler) mellem fladerne. Tilsætning af en lille mængde kuglerunde flyveaskepartikler til beton, får således de større tilslagspartikler til at glide lettere i forhold til hinanden. I den henseende påmindelse effekten af flyveaskepartiklerne om virkningen af tilsigtet inblandede luftbobler, der også nedsætter den indre friktion i en betonblanding og dermed forøger den friske betons konsistens. Placering af flere små kugler mellem de to plane flader forbedrer imidlertid ikke bevægeligheden af fladerne yderligere i forhold til hinanden, så længe antallet af små kugler ikke overstiger, hvad der er plads til i et enkelt lag mellem fladerne. Tilsvarende forbedres den friske betons bearbejdelse ikke ved tilsætning af mere flyveaske, udover et vist minimum. Når tilsætningen af runde flyveaskepartikler overstiger, hvad der er plads til i et enkelt lag mellem tilslagspartiklerne, reduceres bevægeligheden af tilslagspartiklerne imidlertid igen. Denne situation svarer til den reducerede bevægelighed, der opnås mellem de ovennævnte to parallelle flader, når der placeres flere kugler imellem fladerne, end der er plads til i et enkelt lag kugler.

Disse forklaringer på flyveaskens forbedrende virkning på den friske betons egenskaber er imidlertid, ifølge Helmuth [13], for simple og utilstrækkelige. Helmuth postulerer, at de fineste flyveaskepartikler, der alle har samme negative overfladeladning, absorberes på cementpartiklerne og derved ophæver tiltrækningen mellem cementpartiklerne på samme måde som plastificeringsstoffer. Plastificeringsstoffer er overfladeaktive stoffer, der neutraliserer cementpartiklernes flokkulerende tendens, når de adsorberes på disse partiklers overflader. De reducerer derved partiklernes indbyrdes tiltrækningskraft. Ved tilstrækkelig stor dosering af plastificeringsstoffer ophæves den flokkulerende tendens for partiklerne i blandingen, således at partiklerne fuldstændigt dispergeres. Hvis der tilsvarende tilsættes en tilstrækkelig stor mængde flyveaske, vil cementpartiklerne efter Helmuth's opfattelse ligeledes helt dispergeres, og der opnås mindre friktion, svarende til forøget konsistens hos betonen.

Helmuth bygger sin teori på resultater fra undersøgelser, som er udført på cementpasta, der blev fremstillet af Stuart [36]. Som det fremgår af figur 6.5, viser Stuart's resultater, at simpel cementerstatning af op til ca. 20 volumenprocent flyveaske virker plastificerende på frisk beton, mens forøget tilsætning udover 20% ikke reducerer betonens vandbehov yderligere.

Stuart's resultater svarer til resultaterne af en lignende undersøgelse af flyveaskebeton [25], der blev foretaget ved LBM. I denne undersøgelse blev det fundet at:

"tilsætningen af så små mængder flyveaske som 20% af cementvægten virker plastificerende på den friske beton, medens tilsætning af flyveaske udover de 20% ikke har nogen yderligere plastificerende virkning".

På baggrund af disse resultater kan Lyse's lov for almindelig beton udvides til også at omfatte flyveaskebeton. Et af formålene med den foreliggende undersøgelse har netop været at verificere Lyse's lov for flyveaskebeton, der i sin udvidede form har følgende ordlyd:

"Konsistensen af friske flyveaskebetonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, beror udelukkende på det effektive vandindhold, mens konsistensen er uafhængig af såvel cementindholdet som af flyveaskeindholdet, såfremt flyveaskeindholdet overstiger et vist minimum".

Lyses modificerede lov bygger på forsøg af Hedegård [25].

6.2.2 Flyveaske virkning på frisk betons kohæsion

Som tidligere nævnt angiver ligning 6.6 det omtrentligt mindste vand/cement + flyveaske forhold, ved hvilket beton kan udstøbes og vibreres uden brug af plastificeringsstoffer:

$$\frac{v}{c + 1.43f} = 0.38 \quad (6.6)$$

Ved lavere vand/cement + flyveaske forhold bliver betonen ofte så klæg, at den kun med vanskelighed kan udstøbes og vibreres. Hvis der tilsættes plastificeringsstoffer, kan tallet på højre side af ligningen reduceres betydeligt, se Hedegård [25].

Hvis v og c er kendte størrelser, kan den størst mulige mængde flyveaske f , hvormed betonen kan fremstilles uden at blive klæg, beregnes på grundlag af ligning 6.6. Hvis på den anden side af sagen, der fremstilles betoner på grundlag af for høje værdier af tallet på højre side af ligning 6.6, kan betonens kohæsion ødelægges, og der vil desuden være risiko for vandseparation fra den friske betonblanding, såkaldt bleeding. I visse tilfælde kan situationen klares ved at sætte fortykningsstoffer som polyethylenoxid til den friske beton. Dette problem har forfatteren perifert beskæftiget sig med i undersøgelsen.

Det bemærkes endvidere, at flyveaske virker som fint tilslag i beton. For at undgå at flyveaskebeton bliver for klæg, bør betonens sandprocent derfor reduceres, når der tilsættes flyveaske. Hedegård [25] har fundet, at man opnår en tilfredsstillende sandprocent for flyveaskebeton, hvis vægtmængden flyveaske omregnes til en ækvivalent vægtmængde cement på volumenbasis. Det vil sige, at man som indgangsværdi i figurerne 6.2 bruger forholdet:

$$\frac{v}{c + \left(\frac{d_c}{d_f}\right)f} \text{ i stedet for } \frac{v}{c}$$

hvor v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)
 c = betonens cementindhold, (kg/m³)
 f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)
 d_c = cementens korndensitet, (kg/m³)
 d_f = flyveaskens korndensitet, (kg/m³)

6.2.3 Flyveaskes virkning på frisk betons vandseparation

Flyveaske er et fillermateriale ligesom cement. Vandtætte betoner skal som bekendt indeholde en vis mængde filler, hvis man skal undgå vandseparation. DS 411 kræver således, at vandtæt beton skal indeholde mere end 375 kg/m³ cement + filler mindre end 0.25 mm. Den vesttyske norm kræver mere end 525 kg/m³ cement + filler mindre end 0.25 mm, hvis man skal kunne fremstille vandtæt beton med groft tilslag med en maksimal stenstørrelse på 8 mm. Meget i den her foreliggende undersøgelse tyder på, at vesttyskerne har mest ret. Flyveaske kan til en vis grad kompensere for en eventuelt manglende fillermængde i betonen, og asken kan hjælpe med til at blokere kanaler, gennem hvilke vandseparation ellers ville kunne foregå. Vandseparation kan dog også reduceres ved at sætte fortykningsstoffer som polyethylenoxid til den friske beton. Som nævnt har forfatteren kun perifert beskæftiget sig med tilsætning af fortykningsstoffer i denne undersøgelse, men det er et interessant emne og bør gøres til genstand for mere systematiske studier.

6.3 FLYVEASKES VIRKNING PÅ BETONS STYRKE

Det er et væsentligt formål ved enhver betonproportionering at fastlægge relative forhold mellem betonens delmaterialer, således at den hærdnende beton opnår ønsket styrke på givne tidspunkter efter blanding.

For almindelig beton uden flyveaske giver dette ikke anledning til store problemer, fordi den vigtigste parameter med hensyn til betonens styrke er forholdet mellem cementmængde og vandmængde i blandingen, altså det frie eller effektive vand/cement forhold.

Når der tilsættes flyveaske til beton, opstår der imidlertid problemer med at fastlægge netop den sammensætning af delmaterialerne, som giver den bedste beton, set fra en samtidig teknisk og økonomisk synsvinkel. Flyveasken påvirker nemlig, som det tidligere er nævnt, alle betonens egenskaber og i særdeleshed styrke og styrkeudviklingshastighed.

Der er i tidens løb udført mange undersøgelser af flyveaskes virkning på betons styrke. Disse undersøgelser viser, at de vigtigste egenskaber hos flyveaske med hensyn til betons styrkeudvikling er:

- 1) Flyveaskens finhed
- 2) Mængden af reaktivt glas i flyveasken.
- 3) Mængden af $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ i flyveasken

Mange forskere har forsøgt at udvikle kemiske prøvemethoder til bestemmelse af flyveaskes pozzolanegenskaber; men ingen har endnu været i stand til, på en videnskabeligt set tilfredsstillende måde, at sammenkæde flyveaskens kemiske eller mineralogiske sammensætning med dens virkning på betonens styrke. Flyveaskes glødetab er dog en undtagelse, idet der er almindelig enighed om, at et stort glødetab har en negativ effekt på betons styrke. Glødetabet skyldes hovedsageligt tilstedeværelse af uforbrændt kul i flyveaske. Både af hensyn til betons styrkeudvikling, men også af hensyn til en mulig negativ effekt på virkningen af visse kemiske tilsætningsstoffer, bør glødetabet i flyveaske holdes så lavt som muligt.

Flyveaske er ikke et ensartet produkt som cement. Både struktur og kemisk sammensætning af flyveaske varierer med kullenes oprindelse, forbrændingsmetoden, forbrændingsgraden og opsamlingsmetoden. Flere undersøgelser har imidlertid vist, at variationer i flyveaskes sammensætning ikke har nogen større virkning på variationen af betons styrke. Cannon [23] rapporterer således, at der kan forventes en styrkevariation på ca. 4% med flyveaske fra samme værk. Dhir [38] har undersøgt styrkevariationen hos beton, som blev fremstillet med 8 forskellige flyveasker og 7 forskellige cementer. Dhir fandt, at variationen på grund af flyveasketyper er af samme størrelsesorden som styrkevariationen på grund af anvendelse af cement fra forskellige værker.

Stærkt forenklet kan flyveaskens virkning på betons styrke opdeles i følgende hovedpunkter:

- 1) Flyveaskens passive virkning.
- 2) Flyveaskens pozzolane virkning.

Ad 1) **Flyveaskens passive virkning** på betons styrke kan igen opdeles i en direkte virkning og i en indirekte virkning. Den direkte virkning skyldes, at flyveasken normalt nedsætter betonens vandbehov, eller alternativt, at den øger betonens konsistens. Hvis denne virkning udnyttes til at nedsætte betonens indhold af frit vand, uden at cementindholdet samtidig reduceres, opnås selvfølgelig en forøgelse af betonens styrke, fordi vand/cement forholdet reduceres. Den procentuelle reduktion af vandbehovet, som tilsætning af flyveaske medfører, afhænger af mængden partikler i flyveasken, som er større end $45\mu\text{m}$, jævnfør figur 6.4. På trods af vandreduktionen forøges den totale mængde af pasta, dvs. den samlede mængde af cement + vand + flyveaske i betonen, fordi der normalt sættes en langt større mængde flyveaske til betonen, end hvad der svarer til den mængde vand, der spares. Det forøgede pastavolumen i betonen, som er en følge af den øgede mængde flyveaske, betragtes af flere forskere som en væsentlig årsag til flyveaskebetons højere styrke, jævnført med almindelig beton. Cannon [23] mener således, at årsagen til flyveaskebetons højere styrke skyldes en passiv udfyldning af porerne i mørtelen med faste flyveaskepartikler. Herved forøges den gennemsnitlige tykkelse af pastalaget omkring sandpartiklerne i mørtelen, hvilket medfører en stærkere binding mellem sandet og pastaen. Cannon antager, at dette giver anledning til højere mørtelstyrke og dermed også højere betonstyrke.

Flyveaskens tilstedeværelse i beton påvirker også i nogen grad cementens hydratisering. Denne indflydelse kaldes her flyveaskens indirekte virkning, der ikke må forveksles med den senere nævnte pozzolanreaktion. Det er imidlertid ikke klarlagt, hvorledes flyveasken påvirker cementens tidlige reaktioner med vand i betonen, og hvorledes dette påvirker betonens styrkeudvikling. Man ved dog, at virkningen både er afhængig af flyveaskens art og af cementtypen. Montgomery [39] antager, at flyveaskepartiklerne virker som kimdannelsepunkter ved cementhydratiseringen, mens Sellevold [40] mener, at påvirkning af cementens reaktion muligvis er af katalytisk art. Minnock [41] rapporterer, at flyveaskens virkning på cementreaktionerne ved betonens tidlige alder, afhænger mere af dens fysiske og morfologiske egenskaber end af dens kemiske sammensætning. Helmuth [13] er af den opfattelse, at der ret hurtigt efter blanding af flyveaskebeton begynder en reaktion mellem flyveaske og calciumhydroxid i blandingen, men at denne reaktion først bidrager til betonens styrke på et langt senere tidspunkt. Flere undersøgelser af mængden af calciumhydroxid i flyveaskebeton viser imidlertid, at pozzolanreaktionen normalt er ubetydelig selv efter adskillige uger. Helmuth [13] mener ikke, at dette er korrekt, men at det dels skyldes forskelle i de undersøgte flyveaskers reaktivitet, dels den indirekte målemetode, som benyttes til disse undersøgelser.

Det må altså konstateres, at den tidlige styrkeudvikling i flyveaskebeton eller pasta sandsynligvis skyldes flyveaskens fysiske tilstedeværelse, snarere end en kemisk omdannelse af flyveaskepartiklerne. Ved senere terminer skyldes virkningen af flyveasken derimod utvivlsomt askens pozzolan-egenskaber, som er beskrevet i det følgende.

Ad 2) **Flyveaskens pozzolan-egenskaber** beror i det alt væsentlige på askens store indhold af reaktiv silikat, der, efterhånden som cementen hydratiserer, reagerer med den derved dannede calciumhydroxid. Herved opstår et styrkebidragende kalciumpulverhydrat, som er nært beslægtet med cementens tobermoritgel. Ofte bidrager flyveasken selv med en vis mængde calciumhydroxid, hvilket for eksempel er tilfældet for alle ASTM klasse C flyveasker, men også i mindre grad for mange ASTM klasse F flyveasker.

Det er muligt at opstille støkiometriske ligninger og beregne, hvor stor en mængde flyveaske, der kan reagere kemisk i en foreliggende beton. Helmuth [42] har udregnet den mængde calciumhydroxid, der produceres ved hydratisering af en given mængde Portland cement og den mængde flyveaske, der er nødvendig for at opnå fuldstændig reaktion mellem flyveaske og denne mængde calciumhydroxid. Helmuths beregninger er baserede på en typisk flyveaske, som indeholder 50% SiO_2 og 30% Al_2O_3 . Beregningerne viser, at der kun kan opnås fuldstændig reaktion med 0.3 - 0.5 kg flyveaske per kg cement, hvilket svarer til 22 - 33 vægtprocent flyveaske i forhold til den samlede mængde cement og flyveaske. Sådanne beregninger ligger til grund for begrænsningerne i de flyveaskemængder, der tillades sat til beton i henhold til den danske betonnorm. Man er bange for, at flyveasken skal reagere med al calciumhydroxyd i beton og derved sænke porevæskens pH-værdi i en sådan grad, at der opstår risiko for armeringskorrosion. Beregningerne er imidlertid teoretiske og forudsætter, at hele flyveaskemængden består af fint reaktivt glas. I praksis udgør den reaktive del kun mellem 60 - 90% af flyveaskemassen, og Helmuth [13] pointerer da også, at den aktuelle mængde flyveaske, der skal være tilstede, for at der skal kunne opnås fuldstændig kemisk reaktion med al calciumhydroxyd, ofte er dobbelt så stor, som ovenfor nævnt. Hvis flyveasken desuden i sig selv indeholder CaO , bliver den nødvendige flyveaskemængde endnu større.

De fineste korn i flyveaske er de mest reaktive. Det er formentlig en af årsagerne til, at der er rimelig god overensstemmelse mellem flyveaskes reaktivitet og finhed. Som et groft mål på flyveaskes finhed benyttes ofte den procentuelle andel af flyveasken, der tilbageholdes på en 45 μm sigte.

Det er velkendt, at slutstyrken af almindelig beton, der fremstilles uden tilsætning af flyveaske, reduceres med stigende lagringstemperatur. Derimod er temperaturens virkning på pozzolan-reaktionerne endnu langt fra klarlagt. I praksis er det imidlertid vist, at flyveaskebetons slutstyrke øger med stigende lagringstemperatur op til ca. 60° C. Hvis der benyttes højere lagringstemperaturer end ca. 60° C, bliver flyveaskebetons slutstyrke derimod lavere end for tilsvarende beton, der lagres ved lavere temperatur.

Det må således konstateres, at vi endnu langt fra kender alle de egenskaber hos flyveasken, som er ansvarlige for dens virkning i beton, og at vi i praksis foreløbig er henvist til at fastlægge flyveaskes virkning på betons styrke ved forsøg. Sådanne forsøg udføres bedst og sikrest med de i hvert enkelt tilfælde aktuelle betonblandinger. I den forbindelse ville det være til stor hjælp, hvis man kunne opstille en empirisk formel for flyveaskebetons styrke som funktion af c/v og f/v -forholdene. Formlen ville gøre det muligt at reducere antallet af nødvendige prøveblandinger ganske betydeligt. Opstilling af en sådan empirisk formel har netop været et af de væsentligste formål med den foreliggende undersøgelse.

I tidligere undersøgelser fandt Narud [29] og Hedegård [25] indikationer på, at flyveaskebetons styrke kan beregnes ved hjælp af følgende udvidede Bolomey ligning (6.7).

$$f_c = A \frac{c}{v} + B \frac{f}{v} + D \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E \quad (6.7)$$

hvor f_c = betonens trykstyrke, (MPa).

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

A, B, D og E = konstanter for givne delmaterialer og hærdetider.

Det har været et vigtigt formål med den i det følgende afsnit 6.4 beskrevne del af det foreliggende projekt, at undersøge om Bolomey's udvidede ligning gælder generelt for alle betoner, uanset med hvilke cement- og flyveasketyper de fremstilles.

Der er imidlertid to principielt forskellige måder, på hvilke man kan undersøge gyldigheden af Bolomey's udvidede ligning. Begge metoder er brugt ved vurderingen af de eksperimentelle resultater, der er opnået i denne undersøgelse.

Ved den første og direkte metode til fastlæggelse af konstanterne, A , B , D og E i ligning 6.7 foretages en almindelig multilinear regressionsanalyse af forsøgsresultaterne, hvor disse alle indgår på lige fod helt uden restriktioner på konstanterne. Herved sikrer man sig, at der set fra et matematiske synspunkt, opnås den mest nøjagtige ligning til beregning af flyveaskebetons styrke. Til gengæld er der ingen sikkerhed for, at de opnåede værdier for konstanterne A , B , D og E gør det muligt at tillægge de enkelte led i den matematiske model nogen fysisk betydning. I forbindelse med brug af denne metode er det valgt at benytte indekset 1 for konstanterne. Derved får ligning 6.7 følgende udseende:

$$f_c = A_1 \frac{c}{v} + B_1 \frac{f}{v} + D_1 \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E_1 \quad (6.7a)$$

hvor A_1 , B_1 , D_1 og E_1 er konstanter, som er fundet ved almindelig multilinear regressionsanalyse til bestemmelse af den bedst mulige model for flyveaskebetons styrke.

Ved den anden metode til fastlæggelse af konstanterne A , B , C og D i ligning 6.7 foretages også en multi-linear regressionsanalyse af forsøgsresultaterne; men her udnyttes "kendt" viden til at styre værdien af konstanterne, således at der opnås en fysisk forklarlig model. Denne metode til bestemmelse af konstanterne sikrer imidlertid ikke, at der opnås den mest nøjagtige ligning til beregning af flyveaskebetons styrke på basis af de opnåede forsøgsresultater. At udnytte kendt viden består i at vælge værdien af konstanterne A og E , således at de stemmer med Bolomey's ligning for beton uden flyveaske, som udtrykt i ligning 6.2. I princip betyder det, at man antager, at den hydratiserende cement udvikler sin naturlige styrke som funktion af vand-cement forholdet helt uafhængig af tilstedeværelsen af flyveaske. Denne antagelse synes bekræftet ved separate forsøg [29].

Som tidligere omtalt tyder eksisterende viden på, at flyveaskes virkning på betons styrke ved tidlige terminer alene skyldes dens fysiske tilstedeværelse, mens det først er på et senere tidspunkt, at flyveasken aktivt bidrager til betonstyrken som følge af dens pozzolanegenskaber. Dette fører naturligt til opstilling af den hypotese, at flyveaskebetons trykstyrke (f_c) kan udtrykkes som en sum af tre indbyrdes uafhængige styrkebidrag, således som det er antydnet i ligning (6.7)

$$f_c = f_{alm} + f_{passiv} + f_{aktiv} = \left(A \cdot \frac{c}{v} + E \right) + \left(B \cdot \frac{f}{v} \right) + \left(D \cdot \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} \right) \quad (6.7)$$

hvor f_{alm} = cementens bidrag til flyveaskebetons styrke svarende til almindelig beton, som fremstilles med de aktuelle delmaterialer, men uden tilsætning af flyveaske. Bidraget kan beregnes ved hjælp af Bolomey's generelle ligning for beton uden tilsætning af flyveaske, som angivet i ligning 6.2:

$$f_{alm} = A \cdot \frac{c}{v} + E \quad (6.2)$$

Værdierne af konstanterne A og E vil normalt være kendte for de aktuelle tilslagsmaterialer og for den benyttede cement. Hvis dette ikke er tilfældet, kan de fastlægges ved hjælp af prøveblandinger med betoner, som fremstilles med disse materialer; men uden tilsætning af flyveaske.

f_{passiv} = flyveaskens passive bidrag til betonens styrke alene på grund af askens fysiske tilstedeværelse i betonen. Det postuleres, at bidraget kan beregnes ved hjælp af ligning 6.10:

$$f_{passiv} = B \cdot \frac{f}{v} \quad (6.10)$$

Konstanten B er specifik for den aktuelle flyveaske, og værdien af B kan fastlægges ved hjælp af tidlige trykstyrkeresultater for flyveaskebetonen, når konstanterne A og E i Bolomeys almindelige ligning 6.2 er kendte størrelser.

f_{aktiv} = flyveaskens aktive eller pozzolane bidrag til betonens styrke på grund af askens kemiske reaktion med den calciumhydroxid, der produceres ved hydratisering af cementen. Bidraget er specifikt for den aktuelle cement og flyveaske. Det postuleres, at bidraget kan beregnes ved hjælp af ligning 6.11:

$$f_{aktiv} = D \cdot \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} \quad (6.11)$$

Konstanten D, der både er afhængig af den benyttede cement og flyveaske, kan fastlægges ved hjælp af styrkeresultater for flyveaskebetoner, når konstanterne A, B og E i ligning 6.2 og 6.10 er kendte størrelser.

I den her foreliggende undersøgelse er det for det første undersøgt, om styrken af flyveaskebeton kan beskrives ved hjælp af den generelle udvidede Bolomey ligning, som fremgår af 6.7a. For det andet er det undersøgt, om styrken af flyveaskebeton kan beskrives ved hjælp af den udvidede Bolomey ligning, som fremgår af ligning 6.7, og som sikrer en fysisk forklaring på de i ligningen indgående uafhængige bidrag til flyveaskebetons trykstyrke:

$$f_c = A \frac{c}{v} + B \frac{f}{v} + D \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E \quad (6.7)$$

hvor $A \frac{c}{v} + E =$ cementens bidrag til styrken, der kan fastlægges ved lineær regressionsanalyse af styrkeresultater fra almindelige betoner, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske.

$B \frac{f}{v} =$ flyveaskens passive bidrag til styrken, som fastlægges ved lineær regressionsanalyse af flyveaskebetoners 14-døgns styrker efter følgende ligning (6.12)

$$f_c = A \frac{c}{v} + B \frac{f}{v} + E \quad (6.12)$$

$D \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} =$ flyveaskens aktive kemiske bidrag til styrken af beton, der fremstilles med den aktuelle cement og flyveaske.

Undersøgelsen er samtidig oplagt således, at den klarlægger, om styrken af flyveaskebeton ved tidlige terminer **tilnærmelsesvis** kan beregnes ved hjælp af Smith's traditionelle styrkeligning:

$$f_c = A \left(\frac{c + k_s \cdot f}{v} \right) + E \quad (6.1)$$

hvor k_s er flyveaskens aktivitetsfaktor med hensyn til styrke.

6.4 OPSTILLING AF ARBEJDSHYPOTESE FOR UNDERSØGELSE AF FLYVEASKEBETONERS KONSISTENS OG STYRKE

- A) Det ønskes undersøgt, om Lyse's udvidede lov for betons konsistens, som fremsat i afsnit 6.2.1, gælder generelt for alle betoner, uanset med hvilke typer cement og med hvilke typer flyveaske betonerne fremstilles.
- B) Det ønskes undersøgt, om Bolomey's udvidede lov for betons styrke, som udtrykt ved ligning 6.7 i afsnit 6.3, gælder generelt for alle betoner, uanset med hvilke typer cement og hvilke typer flyveaske betonerne fremstilles.

6.5 FORSØGSPLAN

Med henblik på at udvikle en rationel proportioneringsmetode for flyveaskebeton undersøges bearbejdelighed (dvs. både konsistens, kohæsion og vandseparation) og styrke af fire serier flyveaskebeton, som fremstilles med følgende kombinationer af cement- og flyveasketyper:

TYPE	1. serie	2. serie	3. serie	4. serie
Cement	Lavalkali	Lavalkali	Slite	Slite
Flyveaske	Asnæs	Thy	Asnæs	Thy

I hver enkelt af de 4 serier fremstilles 27 forskellige betonblandinger med følgende kombinationer af c/v- og f/v forhold, der er mærket med kryds:

f/v								c/v
2.0	x	x	x	x				
1.6	x	x	x	x	x			
1.2		x	x	x	x			
0.8		x	x	x	x	x		
0.4			x	x	x	x		
0.0			x	x	x	x	x	
	0.2	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	

Samtlige friske betoners konsistens måles umiddelbart efter fremstillingen. Samtidig bedømmes betonernes kohæsion og vandseparation visuelt. De hærdnede betoners trykstyrker bestemmes efter henholdsvis 14, 28, 56 og 112 døgns vandlagring. Betonerne fra serie 4, der fremstilles med Slite cement og Thy flyveaske, er desuden trykprøvet efter 500 døgns vandlagring.

6.6 MATERIALER

6.6.1 Cement og flyveaske

I undersøgelsen af flyveaske's indvirkning på betons egenskaber, er der udelukkende benyttet cementtyper, som i sig selv ikke indeholder flyveaske. Det fremgår af forsøgsplanen, at der er brugt Lavalkali sulfatbestandig cement, som blev leveret af Aalborg Portland og en almindelig Portland cement fra Slite i Sverige, der blev leveret af Cementa i Malmø. Det var nødvendigt at bruge almindelig Portland cement fra Sverige, da almindelig Portland cement ikke længere fremstilles i Danmark.

Der er brugt to forskellige flyveasker i projektet. Begge blev udvalgt i samarbejde med, og leveret af firmaet Danaske. Den ene flyveaske, der i rapporten benævnes "Asnæs", er udvundet ved forbrænding af polske kul på Asnæsværket. Den repræsenterer ifølge firmaet Danaske en typisk sjællandsk flyveaske. Den anden flyveaske, der nævnes "Thy", er udvundet ved forbrænding af colombianske kul, og repræsenterer en anden flyveasketype, som er almindelig i Jylland.

Bestemmelse af kemisk sammensætning både af flyveasker og cementer er foretaget ved CBL i Aalborg. Analyseresultaterne er vist i tabellerne 6.2 og 6.3. Foruden cementernes kemiske sammensætning, er deres korndensitet bestemt efter ASTM C 188-4. For Slite cement målt en densitet på 3160 kg/m^3 og for Lavalkali cement var densiteten 3200 kg/m^3 . Densiteterne af Asnæs og Thy flyveaske er bestemt til henholdsvis 2200 kg/m^3 og 2260 kg/m^3 . De to flyveasker indeholder henholdsvis 47 og 57 vægtprocent korn større end $75 \mu\text{m}$.

6.6.2 Tilslag.

Som tilslag til alle betonere er brugt bakkesand fra Voervadsbro, der hovedsagelig består af kvarts, og granitskærver fra Rønne med 8 mm max. stenstørrelse. Tilslagsmaterialernes egenskaber er bestemt i henhold til DS.405. Voervadsbrosandet og Rønnegrانيتens gradering er vist i figur 6.9, henholdsvis figur 6.10. Alt tilslagsmateriale blev leveret på en gang ved begyndelsen af projektet, og de viste kornkurver repræsenterer et gennemsnit af løbende målinger af tilslagets gradering under projektet.

Over hele projektperioden er sandet og skærvernes gennemsnitlige SSD-densitet målt til henholdsvis 2670 kg/m^3 og 2600 kg/m^3 med en variation på mindre end 1%. Tilslagsmaterialernes vandabsorption er tilsvarende bestemt til henholdsvis $0.20\% \pm 0.07\%$ for sandet og $1.09\% \pm 0.01\%$ for skærverne.

Både sandet og skærverne er brugt i silotør tilstand, og det aktuelle vandindhold er fastlagt ugentligt i hele støbeperioden.

6.6.3 Tilsætningsstoffer

For at kunne fremstille alle ønskede betonblandinger var det nødvendigt at sætte et plastificeringsstof til de betoner, der indeholdt mest cement og flyveaske.

Der er brugt et superplastificeringsstof med betegnelsen CeMix fra Aalborg Portland. Ifølge leverandøren består dette stof af en 42% vandig opløsning af natriumsaltet af et naftalensulfonsyre/formaldehyd koncentrat.

Plastificeringsstoffet er udelukkende brugt til at forøge bearbejdigheden af betonerne, uden at det frie vandindhold er nedsat. Mængden af tilsat superplastificeringsstof er ikke medregnet i betonernes frie vandindhold.

I denne rapport er der medtaget resultater fra en tidligere fremstillet betonserie med Hvid Portland cement og Asnæs flyveaske. I denne serie blev der benyttet fortykningsmidlet Polyox WSR-301 til fremstilling af meget cement- og flyveaskefattige betoner. Polyox WSR-301 er baseret på vandopløselig polyethylenoxid med en molmasse på omkring 4 mill. Det forøger vandets viskositet og modvirker især bleeding i frisk beton.

6.7 PROPORTIONERING OG STØBNING

De 4 x 27 forskellige betonblandinger er proportioneret efter den tidligere i afsnit 6.1 beskrevne modificerede DOE-metode. Alle betoner er proportioneret til at opnå samme sætmålsniveau på ca. 60 mm. For de cement- og flyveaskerige betoners vedkommende opnås dette sætmål ved at fastholde betonernes frie vandindhold, medens der samtidig tilsættes superplastificeringsstoffet CeMix for at øge konsistensen. Blanderecepterne for de fire forsøgsserier af beton, der fremstilles med henholdsvis Lavalkali/Slite cement og Asnæs/Thy flyveaske, er vist i tabel 6.4.

Der støbes 30 liter beton i hver sats, og betonen blandes i en 75 liter Zyklos tvangsblender efter følgende procedure:

- 1) Samtlige materialer fyldes i blanderen.
- 2) Vandet tilsættes i løbet af det første halve minut.
- 3) Betonens bearbejdighed vurderes visuelt, og der tilsættes om nødvendigt plastificeringsstof.
- 4) Der blandes ialt effektivt i 5 minutter.

Af hensyn til en tidsmæssig rimelig fordeling af senere målinger af de hærdnede betoners egenskaber, fremstilles kun en betonblanding pr. dag.

Konsistens, densitet og luftindhold af de friske betoner måles i henhold til DS 423. Desuden foretages en visuel bedømmelse af betonernes kohæsion og vandseparation.

Til brug ved støbning af cylindre til bestemmelse af betonernes trykstyrker blev der fremstillet 24 stk. "60/120" mm cirkulære støbeforme. Formene fremstilledes af standard PVC vandrør med pålimet forstærkning i hver ende, således som det er vist på figur 6.6. Cylinderformene er indvendigt afdrejede til en diameter på 57.5 mm, svarende til et effektivt trykareal på 26 cm² for de

fremstillede prøvelegemer. Før udstøbning spændes formene fast på en stålplade, der har plads til 12 cylindre, således som det fremgår af figur 6.7. Prøvelegemerne udstøbes efter følgende procedure:

- 1) Cylindrene fyldes i 3 omgange med overhøjde og vibreres derefter på et vebebord i 15 sek.
- 2) Overfladen afglattes og formene monteres med låg.
- 3) De udstøbte forme henligger på siden, indtil de afformes efter ca. 20 timers forløb. Efterfølgende vandlagring foregår ved 20° C.

Før afformning placeres de udstøbte plastforme med beton i ca. 45 grader varmt vand i 1 minut. Herefter trykkes betonerne ud af plastformene ved hjælp af det i figur 6.8 viste afformningsapparat.

Betonerne trykprøves efter 14, 28, 56 og 112 døgns vandlagring i overensstemmelse med DS 423.23 på en 60 tons hydraulisk presse. Ved hver termin trykprøves 5 stk 60/120 mm cylindre. Belastningshastigheden styres manuelt og vælges af praktiske grunde til 0.5 ± 0.05 tons per sek., svarende til ca. 5 kN per sek. Beton fra serie 4, der er fremstillet med Slite cement og Thy flyveaske, trykprøves desuden efter 500 døgns vandlagring.

6.8 FORSØGSRESULTATER

6.8.1 Friske betoners sammensætning og egenskaber

De friske betoners egenskaber er vist i tabel 6.5a-d.

Mængden tilsat superplastificeringsstof og de opnåede sætmål for betonerne er desuden optegnet i form af citydiagrammer som funktion af c/v og f/v forholdet i figurerne 6.11a-d, henholdsvis figurerne 6.12a-d.

Til sammenligning er de friske betoners egenskaber fra en tidligere specialserie, der er fremstillet med Hvid Portland cement og Asnæs flyveaske [25], vist i figur 6.13.

6.8.2 Hærdnede betoners styrker.

For serierne 1-4's vedkommende er de hærdnede betoners middeltrykstyrker og spredninger angivet efter henholdsvis 14, 28, 56, 112 og 500 døgn's vandlagring i tabellerne 6.6a-d. Til sammenligning er styrker og spredninger fra den tidligere serie beton, der blev fremstillet med Hvid cement og Asnæs flyveaske medtaget i tabel 6.7. Alle betonstyrker er desuden optegnet som funktion af c/v- og f/v forholdene i form af citydiagrammer i figurerne 6.14a-e. Middeltrykstyrkerne fra prøvning ved hver termin af de fire serier, som blev fremstillet med kombinationer af Slite/Lavalkali cement og Asnæs/Thy flyveaske, er beregnet på grundlag af prøvningsresultater fra 5 stk. 60/120 mm cylindre. Tilsvarende er styrkerne for den særlige beton, der blev fremstillet med Hvid cement og Asnæs flyveaske, beregnet på grundlag af resultaterne til hver termin af 5 stk. 100/200 mm cylindre.

6.9 DISKUSSION

6.9.1 Materialer

Det fremgår af tabel 6.2, at Asnæs og Thy flyveaske indeholder henholdsvis 55 og 64 procent SiO_2 , mens indholdet af Al_2O_3 i de to flyveasker er henholdsvis 30 og 21 procent. Det fremgår ligeledes af tabel 6.2, at mængden opløselig og dermed tilgængelig alkali, beregnet som $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ækv}}$, er 0.32 procent i Asnæs asken, mens der er fundet 0.55 procent alkali i Thy asken. Som konstateret i afsnit 6.6.1 er finheden af de to flyveasker også forskellig. Flyveasken fra Asnæs indeholder 47 procent korn større end 75 μm . Hvorimod flyveasken med benævnelsen Thy indeholder 57 procent korn større end 75 μm . De to flyveasker, som er benyttet i denne undersøgelse, er således væsentligt forskellige set i forhold til den gennemsnitlige sammensætning af danske flyveasker, der fremgår af tabel 5.1.

Sandets funktion i beton er hovedsagelig af volumenudfyldende karakter. Dog virker sandet også sammen med cementen, flyveasken og vandet som et smøremiddel mellem de grovere tilslagspartikler i den friske beton. Sandets art og gradering er derfor af væsentlig betydning for frisk betons konsistens og kohæsion.

I forbindelse med den foreliggende undersøgelse er det valgt at bruge Voervadsbrosand, fordi det er et naturligt forekommende bakkesand, som til størstedelen består af ren kvarts. Voervadsbrosand er derfor et af de bedst egnede tilslagsmaterialer i Danmark, hvis man ønsker at undgå alkalisk reaktion [43], og alkalisk reaktion er specielt uønskede i forbindelse med den i afsnit 7 beskrevne undersøgelse af kloridindtrængning i beton.

Kornkurven for Voervadsbrosandet i figur 6.9 viser, at sandet i sin helhed ligger i zone 3 i henhold til BS 882-1973. Set fra et graderingsmæssigt synspunkt kan sandet derfor klassificeres som brugbart, omend ikke ideelt, til fremstilling af beton. Den forholdsvis fine gradering er ensbetydende med, at beton, som fremstilles med dette sand har større vandbehov, end beton som fremstilles med et ideelt graderet sand i zone 2. Det fremgår i øvrigt af graderingskurven for sandet, at det indeholder ca. 28 procent filler, d.v.s. materiale med en kornstørrelse mindre end 0.25 mm. Voervadsbrosandet er derfor velegnet til fremstilling af vandtæt beton. Som tidligere nævnt kræver DS 411, at den samlede mængde cement plus filler, skal være større end 375 kg pr. m³, hvis beton skal være vandtæt. Den vesttyske norm kræver tilsvarende, at den samlede mængde cement plus filler skal være mindst 525 kg/m³, hvis man ønsker at fremstille en vandtæt beton med et groft tilslag med en maksimal kornstørrelse på 8 mm.

For at undgå alkalisk reaktion er der brugt Rønnegranit som groft tilslag. Det fremgår af figur 6.10, at kornkurven for granitskærverne i sin helhed ligger inden for de graderingsgrænser for materiale med 8 mm nominelt maksimal stenstørrelse, der er krævet i BS 882-1973. Granitskærverne kan derfor klassificeres som velegnet tilslag til betonfremstilling.

Med de valgte materialer kan sandsynligheden for, at der skulle opstå forstyrrende alkalisk reaktioner, som i givet fald kunne influere på styrke, diffusionstæthed og permeabilitet af de fremstillede betoner, anses som værende forsvindende lille. Der blev da heller ikke observeret alkalisk reaktion i forbindelse med projektet.

6.9.2 Friske betoners sammensætning og egenskaber

6.9.2.1 Beton uden flyveaske

Den benyttede D.O.E. proportioneringsmetode [28] angiver, at man skal bruge 195 liter frit vand pr. m³ beton for at opnå et sætmål for frisk beton på ca. 6 cm. Det frie vandindhold findes ved hjælp af tabel 6.1, idet vandbehovet for bakkesandet regnes med en vægt på 2/3 af de relevante tabelværdier, og vandbehovet for skærverne regnes med en vægt på 1/3 af de relevante tabelværdier.

Det fremgår af tabellerne 6.5a-d, at Slite og Lavalkali beton uden flyveaske, som fremstilles med ca. 195 liter vand pr. m³ beton i realiteten opnår et gennemsnitligt sætmål på 8 cm. Det kan altså konstateres, at der med de aktuelle materialer opnås en lidt højere betonkonsistens, end hvad der fremgår af tabel 6.1. Det er imidlertid ikke unormalt i betragtning af, at de angivne tabelværdier kun er vejledende. Det er velkendt, at det aktuelle sætmål for frisk beton, som fremstilles med en given vandmængde, altid må bestemmes ved hjælp af prøveblandinger.

6.9.2.2 Flyveaskebeton uden tilsætningsstoffer.

Den udvidede D.O.E. metode til proportionering af flyveaskebeton, som er beskrevet i afsnit 6.1, angiver, at der skal bruges 178 liter vand pr. m^3 beton, for at opnå et sætmål på 6 cm. Det frie vandindhold for flyveaskebeton findes som ovenfor ved hjælp af tabel 6.1, idet der aflæses et vandbehov for det næstlavere konsistensområde end det ønskede, i dette tilfælde et sætmål på 0-3 cm. Hvis der i tabellerne 6.5a-d ses bort fra de allersvageste flyveaskebetoner, opnås der et gennemsnitligt sætmål for flyveaskebetonerne på ca. 7 cm for de aktuelle materialer og med et frit vandindhold på ca. 178 liter.

Det kan således konstateres, at vandbehovet for flyveaskebeton, som fremstilles med kombinationer af Slite/Lavalkali cement og Asnæs/Thy flyveaske, kan udledes af de forhåndenværende tabelværdier, ved at vælge værdier for det næstlavere konsistensområde i forhold til det ønskede.

Den foreliggende undersøgelse viser, at tilsætning af Asnæs eller Thy flyveaske til beton, som fremstilles med Lavalkali eller Slite cement, reducerer betons vandbehov fra 195 l/m^3 til 178 l/m^3 , svarende til en reduktion på ca. 9 procent. En tidligere undersøgelse [25], hvis resultater er vist i figur 6.13, har vist, at tilsætning af Asnæs flyveaske til beton, som fremstilles med Hvid cement, reducerer den friske betons vandbehov fra 150 l/m^3 til 137 l/m^3 , altså ligeledes en reduktion på ca. 9 procent.

Det bemærkes, at reduktionen i flyveaskebetonernes vandbehov er uafhængig af f/v forholdet i det undersøgte f/v -område. Derfor er vandreduktionen uafhængig af, hvor meget flyveaske der benyttes ved fremstilling af beton. Selv små mængder flyveaske, svarende til små f/v forhold, reducerer betons vandbehov med ca. 9 procent for samme sætmål, i forhold til beton som fremstilles uden flyveaske, altså med f/v værdier på 0.

Som tidligere nævnt, kan flyveaskens forbedrende virkning på betons konsistens sammenlignes med den forbedrede bevægelighed, der opnås mellem to plane flader af et fast stof, når der placeres nogle enkelte små kugler mellem fladerne. Tilsætning af en forholdsvis lille mængde flyveaske til beton, får de større tilslagspartikler til at glide lettere i forhold til hinanden. Yderligere tilsætning af runde flyveaskepartikler ændrer ikke bevægeligheden af tilslagspartiklerne, så længe antallet af små kugler ikke overstiger, hvad der er plads til i et enkelt lag mellem de større tilslagspartikler. Når tilsætningen af runde flyveaskepartikler overstiger, hvad der er plads til i et enkelt lag mellem tilslagspartiklerne, reduceres bevægeligheden af tilslagspartiklerne imidlertid. Denne situation svarer til den reducerede bevægelighed, der opnås mellem de ovennævnte to parallelle flader, når der placeres flere kugler imellem fladerne, end der er plads til i et enkelt lag kugler.

Ifølge Helmuth [15] kan flyveaskens forbedrende effekt på betonens konsistens, som tidligere nævnt, imidlertid også skyldes elektrostatiske kræfter, der virker imellem flyveaskepartiklerne i opslæmningen. Disse kræfter hindrer cementkornene i at flokkulere. Dette vil ifølge Helmuth medføre, at flyveasken fungerer på samme måde som et plastificerende tilsætningsstof i den friske beton.

Uanset, hvad forklaringen på fænomenet end måtte være, kan det konstateres, at tilsætning af små mængder flyveaske til beton reducerer betonens vandbehov med ca. 9 procent, medens yderligere tilsætning af flyveaske, inden for vide grænser, ikke ændrer betonens vandbehov yderligere.

På grundlag af den foreliggende undersøgelse kan det derfor også konkluderes, at Lyses lov med rimelighed kan udvides til generelt at omfatte flyveaskebeton inden for et meget bredt spektrum af blandinger. Denne konklusion bør naturligvis verificeres ved at gennemføre lignende forsøg ved andre konsistensniveauer og med andre cement- og flyveasketyper.

Der er dog grund til at antage, at Lyses lov virkelig kan udtrykkes i følgende modificerede ordlyd, som den blev fremsat på hypotetisk form i kapitel 6.2.1.

"Konsistensen af friske flyveaskebetonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, beror udelukkende på det effektive vandindhold, medens konsistensen er uafhængig af såvel cementindholdet som af flyveaskeindholdet, såfremt flyveaskeindholdet overstiger et vist minimum".

6.9.2.3 Virkning af superplastificeringsstof

Det fremgår af tabel 6.5a-d, at det var vanskeligt at opnå det ønskede sætmål på ca. 6 cm for en del cementrige og flyveaskerige blandinger. Sætmålet for disse blandinger, som blev fremstillet med fastholdt frit vandindhold, kunne kun opnås ved tilsætning af et superplastificeringsstof til betonene. Små variationer i doseringen af det tilsatte superplastificeringssted gav imidlertid anledning til store variationer i det opnåede sætmål, som derfor var svært at styre.

Sætmålet er imidlertid et utilstrækkeligt mål for cement- og flyveaskerige betoners bearbejdelse. På grund af visse friske betonblandingers store kohæsion, kan selv beton med rimelige sætmål være vanskelige at komprimere. Det er vor erfaring, at cement- og flyveaskerige beton generelt bør fremstilles med et sætmål, som er ca. 30-40 procent større end normalt, for at betonernes bearbejdelse som helhed skal svare til bearbejdelsen af en beton med moderat indhold af flyveaske og cement.

I en tidligere undersøgelse af Hedegård [25] blev det konstateret, at flyveaskebeton kan fremstilles med samme sætmål ved anvendelse af samme frie vandindhold og uden brug af tilsætningsstoffer, hvis følgende ligning er opfyldt:

$$\beta > \frac{v}{c + \frac{d_c}{d_f} f} > \alpha \quad (6.13)$$

hvor d_c = densitet af cement, (kg/m³)

d_f = densitet af flyveaske, (kg/m³)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m^3)

α = nedre v/c tals grænse for fremstilling af beton med de aktuelle delmaterialer og med normal kohæsion uden tilsætning af plastificeringsstof

β = øvre v/c tals grænse for fremstilling af beton med de aktuelle materialer og med normal kohæsion uden tilsætning af fortykningsstof.

For den særlige forsøgsserie, der blev fremstillet med Hvid cement og Asnæs flyveaske, blev α bestemt til ca. 0.35, mens β blev vurderet til ca. 1.0. For flyveaskebetons vedkommende, som blev fremstillet med henholdsvis med Slite/Lavalkali cement og Asnæs/Thy flyveaske, blev α fundet til ca. 0.38. Grænsen for fremstilling af flyveaskebeton uden tilsætning af plastificeringsstof, svarende til højre del af uligheden (6.13), for hver af de fire serier, kan derfor udtrykkes ved hjælp af hver af de følgende ligninger (6.13a-d):

$$\text{Serie 1 (Lavalkali/Asnæs):} \quad \frac{v}{c + 1.46 \cdot f} = 0.38 \quad (6.13a)$$

$$\text{Serie 2 (Lavalkali/Thy):} \quad \frac{v}{c + 1.42 \cdot f} = 0.38 \quad (6.13b)$$

$$\text{Serie 3 (Slite/Asnæs):} \quad \frac{v}{c + 1.44 \cdot f} = 0.38 \quad (6.13c)$$

$$\text{Serie 4 (Slite/Thy):} \quad \frac{v}{c + 1.40 \cdot f} = 0.38 \quad (6.13d)$$

Disse praktiske grænser for fremstilling af beton med normal kohæsion og uden behov for plastificeringsstoffer er indtegnede i figur 6.11a-d. Det ses af figurerne, at grænserne ikke helt stemmer overens med de aktuelle grænser for nødvendig brug af superplastificeringsstof, som blev konstateret i de fire forsøgsserier. Den manglende overensstemmelse mellem formler og praktisk erfaring kan skyldes, at faktoren d_c/d_f i ligning (6.13) udelukkende tager hensyn til den volumenmæssige forskel mellem cement og flyveaskepartikler i den friske beton, medens faktoren ikke tager hensyn til forskellen i de to delmaterialers kornform. Dette bør gøres til genstand for en særlig undersøgelse. I modsætning til cementpartikler er flyveaskepartikler kuglerunde. Muligvis er det dette forhold, der medfører, at faktoren d_c/d_f i ligning (6.13) i praksis bør reduceres med 15-20 procent. En reduktion af d_c/d_f i ligningerne (6.13a-d) på 15-20 procent medfører nemlig, at de fundne empiriske grænser svarer til de aktuelle grænser for nødvendig brug af plastificeringsstof.

Disse nedre grænser for det modificerede vand-pulver forhold for praktisk fremstilling af flyveaskebeton uden behov for superplastificeringsstof er samtidig de øvre grænser for gyldigheden af Lyse's udvidede lov. De øvre grænser for Lyses lov, som i praksis svarer til grænserne for det modificerede vand-pulverforhold for fremstilling af flyveaskebeton uden behov for fortykningsstof, er indtil videre kun bestemt for den tidligere nævnte forsøgsserie med beton, som blev fremstillet med Hvid cement og Asnæs flyveaske. De laveste grænser for c/v - og f/v forhold,

med hvilke der er fremstillet beton i de fire serier, som indgår i den her foreliggende undersøgelse, er netop valgt således, at de friske betoner opnår rimelig kohæsion uden brug af fortykningsstoffer.

6.9.3 Hærdnede betoners styrkeudvikling.

6.9.3.1 Trykstyrker

Ved hver tidstermin er trykstyrker af betoner, som er fremstillet med Slite og Lavalkali cement, fundet ved prøvning af 5 stk. 60/120 mm cylindre. Den gennemsnitlige variationskoefficient på trykstyrkerne viste sig at være 4-7 procent. Specialserien med Hvid cement og Asnæs flyveaske er fremstillet på et tidligere tidspunkt, og det undersøgte c/v - og f/v -område er mindre end for de fire nye serier, som indgår i det her foreliggende projekt. Desuden er middeltrykstyrkerne for betonerne med Hvid cement fundet ved prøvning af 100/200 mm cylindre. For disse betoner var den gennemsnitlige variationskoefficient 4 procent ved alle terminer. Trykstyrker, der er fundet ved prøvning af små cylindre, er generelt større, end hvis der benyttes store cylindre. Dertil kommer, at formmateriale og komprimeringseffekt var forskellige ved de to forsøg. De fundne trykstyrker af Slite og Lavalkali betonerne, der er angivet i tabellerne 6.6a-d, kan derfor ikke direkte sammenlignes med tilsvarende styrker for beton fremstillet med Hvid cement, som er angivet i tabel 6.7.

6.9.3.2 Cement- og flyveasketypernes indflydelse på betonernes styrkeudvikling

Det ses af tabellerne 6.6a-d og figurerne 6.14a-d, at flyveaskebeton, som fremstilles med Slite cement, tilsyneladende opnår lidt højere styrker, især ved tidlige terminer, end tilsvarende betoner, som fremstilles med Lavalkali cement. Det fremgår imidlertid ikke umiddelbart af forsøgsresultaterne, hvorledes typen af flyveaske påvirker styrken af beton, som fremstilles med Lavalkali- eller Slite cement.

Det er derfor undersøgt om cement- og flyveasketypen, for de fire betonserier, som er fremstillet med kombinationer af Slite/Lavalkali cement og Asnæs/Thy flyveaske, har nogen signifikant indflydelse på de fundne betonstyrker. D.v.s., det er undersøgt, om de fire serier statistisk skal behandles hver for sig, eller om styrkeresultaterne fra betoner, som f.eks. er fremstillet med samme cementtype, kan slås sammen i forbindelse med opstillingen af en matematisk model for sammenhængen mellem betons sammensætning og trykstyrke. Dette vil være tilfældet, hvis flyveasketypen ikke bidrager signifikant til de opnåede styrker ved nogen af de undersøgte terminer. Ved denne statistiske undersøgelse benyttes proceduren GLM(General Linear Models) [93], som er en del af det omfattende statistiske analyseprogram SAS, der er tilgængeligt hos UNI-C (Det fælles EDB-anlæg for DTH og andre danske universiteter). GLM proceduren kan behandle diskret fordelte variable såvel som kontinuerte variable, og ved udregningen af den bedste lineære model benytter programmet de mindste kvadraters metode.

Det undersøges, om der, set fra et statistisk synspunkt kan opnås en bedre lineær model for betontrykstyrkerne, hvis der skelnes mellem beton, som er fremstillet med Lavalkali cement, og beton som er fremstillet med Slite cement. Tilsvarende undersøges, om en opdeling mellem styrkeresultater fra betoner, der er fremstillet med Asnæs respektive Thy flyveaske, kan forbedre den lineære styrkemodel.

Da et eventuelt bidrag fra flyveasketype eller cementtype til en styrkemodel er afhængig af den benyttede model, er materialetypenes effekt undersøgt for to forskellige modeller. Dels undersøges den simple model, som er angivet i ligning (6.14), hvor trykstyrken antages kun at være afhængig af betonernes c/v forhold. Dels undersøges den mere komplicerede model (6.15), hvor betonstyrken antages både at være afhængig af c/v - og f/v forholdet og det kombinerede $c/v \cdot f/v$ forhold. Med begge modeller undersøges om en opdeling af styrkeresultaterne efter cementtype, flyveasketype og en evt. vekselvirkning mellem cementtypen og flyveasketypen kan forbedre modellen for flyveaskebetons trykstyrke.

$$f_c = A \frac{c}{v} + E + \{cementtype\} + \{flyveasketype\} + \{cement \cdot flyveasketype\} \quad (6.14)$$

$$f_c = A \frac{c}{v} + B \frac{f}{v} + D \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E + \{cementtype\} + \{flyveasketype\} + \{cement \cdot flyveasketype\} \quad (6.15)$$

Som et eksempel på GLM proceduren, er der i tabel 6.8 vist en udskrift fra materialetypeundersøgelsen af betonernes 28 døgns styrker ved brug af den lineære model (6.14). I tabel 6.8 angiver R-Square eller R^2 , hvor stor en del af variationen på styrken, som den benyttede model kan forklare. Værdien af R^2 kan ligge mellem 0 og 1. Jo større værdien er, desto bedre er den benyttede model. R^2 lig med 0.935 betyder således, at de benyttede uafhængige variable, såsom c/v forhold, cementtype, flyveasketype og eventuel samvirken mellem den benyttede cement og flyveasketype, kan forklare 93,5% af variationen på den uafhængige variable, der i dette tilfælde er betonernes trykstyrke. Resultaterne i tabel 6.8 af den såkaldte "type III SS" test viser bidraget fra den enkelte variable til kvadratsummen, når den betragtede variable er den sidste uafhængige variable, der lægges til modellen. "F" og "Pr > F" angiver det signifikansniveau, på hvilket parameteren er forskellig fra nul. Denne værdi bør normalt være mindre end 0.05, for at den variable kan regnes som værende signifikant. Hvis værdien af Pr > F er større end 0.05, kan den variable normalt udelades af modellen.

De væsentligste resultater af den statistiske analyse, d.v.s. R^2 -værdierne for modellerne 6.14 og 6.15 og Pr > F-værdierne for de mest interessante variable, er vist i tabel 6.9, mens selve analysen er angivet i bilagsrapporten, Programdokumentation, kapitel 2.B.1.

Undersøgelsen af de to benyttede cementtypers indflydelse på betonstyrken viser, at det kun er ved de tidlige terminer, d.v.s. efter 14 og 28 døgn, at cementtypen har signifikant indflydelse på de opnåede betontrykstyrker. Cementtypen er derimod ikke signifikant for betonernes trykstyrke ved senere terminer. Kun når man bruger den mere præcise model (6.15), ser det ud til, at cementtypen igen begynder at påvirke styrken af flyveaskebeton efter 112 døgn.

Det må også konstateres, at styrkeniveauet for flyveaskebetonerne i de fire serier er afhængig af cementtypen ved tidlige terminer, d.v.s. 14 og 28 døgn, mens styrken sandsynligvis er uafhængig af den benyttede cementtype ved senere terminer, d.v.s. 56 og 112 døgn.

Det fremgår endvidere af resultaterne i tabel 6.9, at den benyttede flyveasketype ikke påvirker styrkeniveauet af flyveaskebeton. Kun efter 56 døgns vandlagring og ved brug af styrkemodel (6.15) kan der opnås en lidt bedre fastlæggelse af betonernes styrke, såfremt der skelnes mellem Asnæs og Thy flyveaske. Styrkebidraget efter 56 døgns vandlagring er imidlertid så beskedent, at det er valgt at slå de to flyveasketyper sammen i forbindelse med de videre styrkeundersøgelser.

D.v.s. at styrkeresultaterne for beton, som er fremstillet med Slite cement og Asnæs, respektive Thy flyveaske, er slået sammen til en serie. Ligeledes er styrkeresultaterne for beton, som er fremstillet med Lavalkali cement og Asnæs, respektive Thy flyveaske, slået sammen og behandlet som én serie i de efterfølgende styrkeundersøgelser.

Resultatet af materialeundersøgelsen viser med stor sandsynlighed, at flyveaskebetoner, som fremstilles med samme cementtype, opnår samme trykstyrke, når de fremstilles med to kemisk og fysisk set helt forskellige flyveasketyper.

6.9.3.3 Undersøgelse af Bolomey's udvidede model uden restriktioner på de indgående konstanter.

For tre serier af betoner, som er fremstillet med henholdsvis Slite, Lavalkali- og Hvid cement, men med forskellige asker, er det undersøgt, om trykstyrken af disse betoner kan beregnes ved hjælp af Bolomey's udvidede generelle ligning (6.7a):

$$f_c = A_1 \frac{c}{v} + B_1 \frac{f}{v} + D_1 \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E_1 \quad (6.7a)$$

hvor A_1 , B_1 , D_1 og E_1 er konstanter, som ved en lineær regressionsanalyse ikke nødvendigvis opnår værdier, der kan forklares fysisk. Der er således ingen garanti for, at A_1 og E_1 ved en lineær regressionsanalyse af styrkeresultaterne efter ligning 6.7a kommer til at svare til hældningen, henholdsvis skæringen med styrkeaksen for Bolomey's almindelige ligning for beton, der fremstilles uden flyveaske. Det er netop denne utilfredsstillende fysiske forklaring på de opnåede konstanter ved regressionsanalysen, der gør det nødvendigt at skelne mellem ligning 6.7a og ligning 6.7, som omtalt i afsnit 6.3.

I forbindelse med den statistiske undersøgelse benyttes proceduren REG [93, 94], som er en almindelig regressionsanalyse indeholdt i det statistiske analyseprogram SAS. REG proceduren benytter ligesom GLM proceduren de mindste kvadraters metode til beregning af den bedste lineære model og de bedste estimater for de uafhængige variable i en undersøgt model.

Ved lineær regressionsanalyse efter ligning (6.7a) bruges de i tabel 6.6a-d viste middeltrykstyrker for betonerne, og hver af disse styrker vægtes med forholdet mellem den fundne middeltrykstyrke og den opnåede spredning på trykstyrkeresultaterne. Herved opnås, at styrken for hver enkelt betonblanding kun tæller med i analysen med en vægt, der afhænger af, hvor nøjagtigt mid-

delstyrken er bestemt, og som er uafhængig af styrkeniveauet. Dette betyder samtidigt, at der ikke er taget hensyn til, at modellen burde passe ved nulstyrker. D.v.s., det akcepteres, at en beregnet styrke for de svageste betoner eventuelt kan blive negativ.

I tabel 6.10 er vist et eksempel på udskrift fra en regressionsanalyse, som er foretaget efter ligning 6.7a for 14 døgns styrkerne af betoner, der fremstilles med Lavalkali cement og Asnæs og Thy flyveaske. Udskriften fra REG proceduren er stort set identisk med udskriften fra GLM proceduren, som er beskrevet i afsnit 6.9.3. REG-proceduren medtager dog også en justeret R-square (Adj R-Sq) værdi, som tager hensyn til antallet af frihedsgrader i modellen. Den justerede R-square værdi beregnes efter ligning (6.16).

$$Adj\ R - Sq = 1 - (1 - R^2) (DF_{Total} / DF_{Error}) \quad (6.16)$$

REG-proceduren beregner samtidig de estimerede værdier for konstanterne i den relevante matematiske model, såvel som standardfejlen på disse estimerede værdier. Desuden indeholder REG-udskriften, ligesom udskriften fra GLM, en t-test af hypotesen: "parameter = 0" og en angivelse af, om variablen er signifikant eller ej.

De væsentligste resultater af den lineære regressionsanalyse, d.v.s. de estimerede værdier for konstanterne i ligning 6.7a såvel som korrelationskoefficienten for modellen, er samlet i Tabel 6.11. De understregede værdier for konstanterne i Tabel 6.11 er ifølge analysen ikke signifikante (Prob > T større end 0.05) og kan udelades af modellen, hvis dette er ønskeligt. Analysen er i sin helhed præsenteret i bilagsrapporten, Programdokumentation, kapitel 2.B.2.

Det fremgår af tabel 6.11, at der med den generelle udvidede styrkemodel (6.7a), opnås en korrelationskoefficient for styrkeresultaterne mellem 0.95 og 0.98. Ved alle prøveterminer giver Bolomey's udvidede ligning 6.7a således en udmærket beskrivelse af flyveaskebetons styrke, uanset hvilken cementtype der benyttes. Som det fremgår af oversigten i tabel 6.11, er bidraget fra de enkelte led i den generelle model imidlertid langt fra signifikante ved alle prøveterminer. Der er en tendens til, at leddet $B_1(f/c)$ kun er signifikant ved tidlige terminer, hvorimod leddet $D_1(c/v)(f/v)$ kun er signifikant ved sene terminer.

Endelig fremgår det af tabel 6.11, at konstanten E_1 , for beton som fremstilles med Slite cement, ikke bidrager væsentligt til modellen for værdier efter 500 døgns vandlagring af betonen. Det bør dog bemærkes, at antallet af betonblandinger, der er blevet trykprøvet efter 500 døgns vandlagring, er begrænset til 21, hvorimod der er trykprøvet 49 forskellige betonblandinger ved de øvrige terminer, jvf. Tabel 6.6c og d.

Det kan altså konstateres, at den udvidede, generelle Bolomey ligning (6.7a), giver en udmærket beskrivelse af flyveaskebetons styrke ved alle undersøgte terminer, men at modellen ved tidlige terminer som 14 og 28 døgns kan reduceres til:

$$f_c = A_1 \frac{c}{v} + B_1 \frac{f}{v} + E_1 \quad (6.12a)$$

Denne ligning kan imidlertid omskrives til:

$$f_c = A_1 \left[\frac{c + k_s f}{v} \right] + E_1 \quad (6.1a)$$

Det ses af omskrivningen, at ligning (6.1a) i princip er identisk med Smith's traditionelle ligning (6.1) for beregning af flyveaskebetons styrke (se afsnit 6.1), i hvilken flyveaskens bidrag til betonstyrken er fastlagt ved aktivitetsfaktoren k_s . Aktivitetsfaktoren k_s angiver flyveaskens reaktionsevne i forhold til cementen med hensyn til styrke. Ved tidlige terminer beror denne reaktionsevne af flyveasken antagelig alene på flyveaskens fysiske tilstedeværelse. Den eneste forskel mellem ligning (6.1) og (6.1a) er den metode, der anvendes til fastlæggelse af konstanterne i ligningerne. I ligning (6.1) kendes konstanterne A og E ofte fra tidligere anvendelser af den aktuelle cement, eller de fastlægges ved hjælp af prøvestøbninger med almindelig beton uden flyveaske. Konstanterne i ligning (6.1a) fastlægges derimod ved en multilinéær regressionsanalyse af alle forsøgsresultaterne, og denne metode giver ingen sikkerhed for, at de fundne konstanter A_1 og E_1 også er de bedste til fastlæggelse af styrken for almindelig beton uden flyveaske.

Ved senere terminer ser det ud til, at bidraget til betonstyrken fra leddet $B_1(f/v)$ i ligning (6.7a) bliver ubetydeligt. Ved de sene terminer kan ligning 6.7a således forkortes til:

$$f_c = A_1 \frac{c}{v} + D_1 \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E_1 \quad (6.17)$$

Denne simplificerede ligning 6.17 indeholder dels et bidrag til flyveaskebetons styrkeudvikling fra cementen, dels et bidrag fra en vekselvirkning mellem cement og flyveaske, som antagelig skyldes pozzolanreaktionen. Ligningen indeholder derimod ikke noget bidrag til betonstyrken fra flyveasken alene.

Det kan konkluderes, at flyveaskebetons trykstyrke efter 14 og eventuelt 28 døgn kan beregnes ved hjælp af den traditionelle ligning (6.1a), mens styrken ved senere terminer kan beregnes ved hjælp af ligning (6.17).

Den udvidede model, som er udtrykt ved 6.7a, giver således en udmærket matematisk beskrivelse af flyveaskebetons styrke ved alle terminer, men den giver hverken nogen logisk forklaring på cementens eller på flyveaskens bidrag til styrken.

6.9.3.4 Undersøgelse af Bolomey's udvidede model med restriktioner på de indgående konstanter

Det er netop denne mangel på logisk forklaring af de enkelte led i den simple matematiske model, der har foranlediget opstilling af den udvidede model, som er beskrevet ved ligning (6.7)

$$f_c = A \frac{c}{v} + B \frac{f}{v} + D \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E \quad (6.7)$$

Det antages her, at leddet $B(f/v)$ alene svarer til flyveaskens passive bidrag til betonens styrke, her valgt bestemt efter 14 døgn, mens det antages at leddet $D(c/v)(f/v)$ alene svarer til flyveaskens aktive bidrag til styrken på grund af reaktion med calciumhydroxid, der udvikles ved cementens reaktion med vand.

En lineær regressionsanalyse af forsøgsresultaterne i henhold til ligning 6.7, må derfor foretages i tre trin:

- 1) I første trin bestemmes konstanterne A og E i Bolomey's almindelige ligning 6.2 ved en lineær regressionsanalyse af alle betonblandinger, som ikke indeholder flyveaske.

$$f_c = A \cdot \frac{c}{v} + E \quad (6.2)$$

- 2) Når konstanterne A og E er kendte størrelser, kan flyveaskens passive bidrag til styrken, dvs. konstanten B fastlægges ved lineær regressionsanalyse af 14 døgns styrkerne efter ligning 6.12. Det er her forudsat, at flyveaskens aktive bidrag til betonstyrken er lig med nul efter 14 døgns vandlagring, og at askens bidrag udelukkende er af passiv karakter, dvs. konstanten $D = 0$.

$$f_c = A \cdot \frac{c}{v} + B \cdot \frac{f}{v} + E \quad (6.12)$$

- 3) I tredje trin foretages den endelige regressionsanalyse i henhold til ligning 6.7, idet værdierne af konstanterne A , E og B nu er kendte, og leddet $D(c/v)(f/v)$ antages at svare til flyveaskens aktive bidrag til flyveaskebetonens styrke.

Regressionsanalysen foretages ved hjælp af den tidligere beskrevne SAS procedure REG. Resultaterne af den endelige statistiske analyse i henhold til ligning 6.7 er vist i tabel 6.12. Analysen er præsenteret i sin helhed i bilagsrapporten, Programdokumentation, kapitel 2.B.3.

Det fremgår af tabel 6.12, at der opnås lige så gode korrelationskoefficienter for den logiske styrkemodel, som for den generelle styrkemodel, se tabel 6.11.

Kun efter 500 døgn er den logiske model dårligere end den generelle model. En sammenligning af de estimerede værdier for konstanterne i de to modeller viser, at dette resultat hovedsagelig skyldes de fundne værdier for A og E i tabel 6.12. Disse konstanter, der i den restriktive model er fastlagt ved hjælp af Bolomey's ligning for beton uden flyveaske, er imidlertid kun fastlagt på grundlag af fire betonblandinger. Blot få ekstra forsøgsresultater kan således væsentligt ændre værdien af konstanterne A og E i Bolomey's ligning efter 500 døgns vandlagring.

Det fremgår i øvrigt af tabel 6.12, at bidragene fra de enkelte led i den logiske model alle er signifikante, bortset fra bidraget fra flyveaskens aktive virkning, der som forudsat er nul ved 14 døgns lagring. At der tilsyneladende opnås et lille, men ikke signifikant bidrag til styrken fra leddet $D(c/v)(f/v)$ ved 14 døgns lagring kan forklares alene ved afrundingsfejl. Det fremgår klart

af den udvidede logiske model, hvad der er cementens bidrag til den opnåede styrke, og hvad der er flyveaskens aktive og passive bidrag til betonstyrkerne. Man ser således, at flyveaskens passive virkning i praksis er næsten ens for de tre undersøgte cementtyper.

Dette passive bidrag svarer efter Smith's model, som udtrykt ved ligning (6.1), til en aktivitetsfaktor k_s efter 14 døgn mellem 0.15 og 0.23 for de tre forsøgsserier.

Der opnås altså en forholdsvis lille aktivitetsfaktor for flyveaskers aktivitet efter 14 døgns vandlagring af betoner med de benyttede cementer og tilslagsmaterialer.

Den forholdsvis lille aktivitetsfaktor for de undersøgte flyveasketyper i dette projekt kan måske forklares ved, at flyveaskens forbedrende effekt på betonstyrkerne ved tidlig alder beror på betonblandingernes sammensætning. Dette skal forstås således, at jo dårligere tilslagsmaterialerne er graderet, desto større forbedrende effekt vil der opnås ved tilsætning af flyveaske, og desto større aktivitetsfaktor vil der opnås for betonerne. I litteraturen mangler der imidlertid undersøgelser af, hvorledes udgangsblandingers sammensætning påvirker flyveaskes aktivitetsfaktor. Med en dårligt bearbejdelig og strid udgangsbeton opnås der sandsynligvis en høj aktivitetsfaktor på grund af en stærkt forbedret bearbejdelighed for betonen og dermed en bedre komprimering af den friske beton. Derimod opnås kun en mindre forbedring af den friske betons egenskaber for velgraderet tilslag og dermed for velbearbejdelige udgangsblandinger. Dette er sandsynligvis ensbetydende med, at flyveaskens aktivitetsfaktor bliver mindre.

6.9.3.5 Undersøgelse af flyveaskebetons styrke som funktion af betonens alder

De i tabel 6.12 fundne konstanter for Bolomey's udvidede restriktive ligning (6.7) er afbildet i figur 6.15 som funktion af betonens alder ved prøvningen. Det fremgår af de optegnede kurver, at der tilnærmelsesvis fås rette linjer, når konstanterne afbildes som funktion af den naturlige logaritme til betonens alder. Der er undersøgt, om der kan opstilles en model for de enkelte konstanter i Bolomey's udvidede ligning, som funktion af betonsammensætning og alder. Resultaterne af denne undersøgelse er vist i tabel 6.13, mens selve analyserne er præsenteret i bilagsrapporten, Programdokumentation.

Det fremgår af tabel 6.13, at der ved en lineær regressionsanalyse af konstanterne A , D og E som funktion af logaritmen til betonens alder opnås korrelationskoefficienter på 0.95 - 0.99 for konstanterne A og D uanset cementtype. Konstanten E er dårligere bestemt. Her opnås kun korrelationskoefficienter på mellem 0.47 og 0.88.

På grundlag af de fundne ligninger for konstanterne i tabel 6.13 er det nu muligt at opstille det samlede ligningssæt for trykstyrken af beton fremstillet med henholdsvis Lavalkali-, Slite og Hvid cement som funktion af betonens alder (t), c/v forholdet og f/v forholdet.

$$f_{c,Lavalkali} = (4,6 \ln(t) + 11,3) \cdot \frac{c}{v} + 4,0 \cdot \frac{f}{v} + (3,5 \ln(t) - 9,8) \cdot \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} - 0,1 \ln(t) + 14,0 \quad (6.18)$$

hvor $R^2 = 0.956$

$$f_{c,Slite} = (4,7 \cdot \ln(t) + 12,0) \cdot \frac{c}{v} + 5,8 \cdot \frac{f}{v} + (3,8 \cdot \ln(t) - 10,5) \cdot \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} - 3,9 \cdot \ln(t) + 2,4 \quad (6.19)$$

hvor $R^2 = 0.941$

$$f_{c,Hvid} = (4,1 \cdot \ln(t) + 16,1) \cdot \frac{c}{v} + 4,0 \cdot \frac{f}{v} + (2,2 \cdot \ln(t) - 5,7) \cdot \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} - 0,6 \cdot \ln(t) + 10,0 \quad (6.20)$$

hvor $R^2 = 0.971$

Selvom konstanten E's afhængighed af betonens alder er temmelig dårligt fastlagt, specielt for Lavalkali beton, ses det af ligningerne 6.18-20, at der som helhed opnås rimeligt gode resultater. Det fremgår nemlig af ligningerne 6.18 - 6.20, at der for alle tre flyveaskebetontyper, som er fremstillet med henholdsvis Slite-, Lavalkali- og Hvid cement, opnås korrelationskoefficienter mellem 0.94 - 0.97.

6.10 KONKLUSION VEDRØRENDE FLYVEASKEBETONS PROPORTIONERING MED HENSYN TIL BEARBEJDELIGHED OG STYRKE

6.10.1 Proportionering af flyveaskebeton

Det konkluderes, at to grundlæggende principper for proportionering af almindelig beton, nemlig Lyse's lov og Bolomey's lov, begge kan udvides til også at omfatte flyveaskebeton.

I denne rapport er den almindelige britiske DOE-metode til proportionering af beton blevet udvidet til at omfatte proportionering af flyveaskebeton. Udvidelsen af DOE-metoden er netop muliggjort ved hjælp af en udvidelse af Lyse's lov for frisk betons konsistens, og en udvidelse af Bolomey's lov for hærdnet betons styrke.

6.10.1.1 Flyveaskebetons konsistens - Lyse's Lov.

I henhold til den udvidede DOE-metode kan vandbehovet for flyveaskebeton findes ved hjælp af traditionelle tabeller, idet man benytter samme procedure som ved proportionering af luftindblandet beton. Det vil sige, at man ved fastlæggelse af vandbehovet for flyveaskebeton for ønsket konsistens blot kan betragte flyveaskepartiklerne som indblandede luftporer. Det frie vandindhold, der er nødvendigt, for at frisk beton skal opnå et vist sætmål, kan således beregnes på grundlag af traditionelle tabeller, som for eksempel tabel 6.1, ved at man vælger tabelværdier for det næstlavere konsistensområde, i forhold til det ønskede konsistensområde. Dette betyder samtidig, at reduktionen i betonernes vandbehov ved tilsætning af flyveaske, inden for vide grænser, er helt uafhængig af, hvor stor en mængde flyveaske, der tilsættes.

I overensstemmelse med den udvidede proportioneringsprocedure kan Lyse's lov således udvides til at omfatte flyveaskebeton inden for et meget bredt spektrum af blandinger.

I den udvidede form får Lyse's lov følgende ordlyd:

Konsistensen af friske betonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, beror udelukkende på det effektive vandindhold, medens konsistensen er uafhængig af såvel cementindholdet som af flyveaskeindholdet, såfremt flyveaskeindholdet overstiger et vist minimum.

De eksperimentelle forsøg, hvis resultater er beskrevet i rapporten, har vist, at Lyse's udvidede lov gælder indenfor følgende grænser:

$$\beta > \frac{v}{c + \Gamma \frac{d_c}{d_f} f} > \alpha \quad (6.24)$$

hvor v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)
 c = betonens cementindhold, (kg/m³)
 f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

d_c = densitet af cement, (kg/m³)

d_f = densitet af flyveaske (kg/m³)

α = nedre v/c tals grænse for Lyse's lov for ekstremt pulverrige betonblandinger

β = øvre v/c tals grænse for Lyse's lov for ekstremt pulverfattige betonblandinger

Γ = formfaktor, der tager højde for flyveaskepartiklernes afrundede form i forhold til cementpartiklernes kantede form.

For flyveaskebeton, der fremstilles med Hvid Portland cement og Asnæs flyveaske, er α og β fundet til henholdsvis 0.35 og 1.0 mens formfaktoren Γ er vurderet til at være lig med 1.0. For flyveaskebeton, der er fremstillet med kombinationer af Slite/Lavalkali cement og Asnæs/Thy flyveaske er α fundet til ca. 0.38, mens Γ er bestemt til ca. 0.8. De fundne gyldighedsområder for Lyse's udvidede lov angiver samtidig de v/c og f/v områder, inden for hvilke flyveaskebeton kan fremstilles uden brug af tilsætningsstoffer af nogen som helst art.

6.10.1.2 Flyveaskebetons trykstyrke - Bolomey's lov.

Det konkluderes, at trykstyrken af flyveaskebeton kan beregnes ved hjælp af følgende udvidede Bolomey lov, som er udviklet på grundlag af fysiske og kemiske betragtninger:

$$f_c = A \frac{c}{v} + B \frac{f}{v} + D \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E \quad (6.7)$$

hvor v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

A og E = konstanter for den aktuelle cement, der er lig med konstanterne i Bolomey's almindelige formel for beton, som fremstilles uden flyveaske.

B = konstant, der tager højde for den aktuelle flyveaskes passive fysiske bidrag til trykstyrken af beton, som fremstilles med den aktuelle cement.

D = konstant, der tager højde for den aktuelle flyveaskes aktive kemiske bidrag til trykstyrken af beton, som fremstilles med den aktuelle cement.

Det fremgår af den matematiske model for flyveaskebetons trykstyrke, der er angivet i ligning 6.7, hvad der er cementens bidrag til betonstyrken, og hvad der er flyveaskens passive og aktive bidrag til betonens styrke.

I den udvidede form får Bolomey's lov følgende ordlyd for flyveaskebeton:

"Betons styrke, ved en given alder, ved en given lagringstemperatur og for givne delmaterialer, beror udelukkende på forholdet mellem mængden af frit støbevand og mængden af cement, samt på forholdet mellem mængden af frit støbevand og mængden af flyveaske."

Ved trykprøvning efter 14 døgn, dvs. ved lave betonaldre, kan Bolomey's udvidede formel simplificeres og omskrives til:

$$f_c = A \frac{c}{v} + B \frac{f}{v} + E \quad (6.12)$$

eller

$$f_c = A \left[\frac{c + k_s f}{v} \right] + E \quad (6.1)$$

Denne ligning svarer til Smith's [16] formel for beregning af flyveaskebetons trykstyrke, hvor der tages hensyn til flyveaskens virkning ved at bruge en aktivitetsfaktor k_s , der angiver reaktionsevnen af den benyttede flyveaske med hensyn til betonstyrke i forhold til den benyttede cements reaktionsevne.

For flyveaskebeton, som er fremstillet med almindelig Portland cement fra Slite i Sverige og Lavalkali cement fra Aalborg Portland, er det fundet, at betons trykstyrke ikke er afhængig af den benyttede flyveasketype. Undersøgelsen viser altså, at flyveaskebeton, som fremstilles med samme cement, opnår samme trykstyrke ved alle aldre, selvom sådan beton fremstilles med kemisk og fysisk set væsentligt forskellige flyveasketyper. Dette betyder, at flyveaskes passive fysiske effekt og den dertil svarende aktivitetsfaktor kun afhænger af den benyttede cement, medens den er uafhængig af den benyttede flyveaske. For flyveaskebeton, som fremstilles med Lavalkali cement og Asnæs eller Thy flyveaske er værdien af B i ligning 6.7, der tager flyveaskens passive virkning i beregning, fundet til 4.0. For flyveaskebeton, som fremstilles med Slite cement er B fundet til 5.8. For Hvid cement svarer flyveaskens passive bidrag til styrken til en værdi for $B = 4.1$.

Disse passive bidrag svarer efter Smith's model, som er udtrykt ved ligning (6.1), til en aktivitetsfaktor k_s efter 14 døgn på henholdsvis 0.17, 0.23 og 0.15 for de tre forsøgsserier.

Flyveaskens aktive kemiske bidrag til betonstyrken, der antages at bero på en reaktion mellem flyveasken og den ved cementshydratiseringen udviklede calciumhydroxyd, er i modsætning til flyveaskens passive bidrag stærkt afhængig af betonens alder. Værdien af D i de tre serier, der tager flyveaskens aktive virkning i beregning, kan således beskrives ved en lineær funktion af den naturlige logaritme til betonens alder t , i døgn, som vist i ligningerne 6.21, 6.22 og 6.23.

For beton med Lavalkali cement og Asnæs/Thy flyveaske er:

$$D = 3.47 \cdot \ln(t) - 9.77 \quad (6.21)$$

For beton med Slite cement og Asnæs/Thy flyveaske er:

$$D = 3.80 \cdot \ln(t) - 10.5 \quad (6.22)$$

For beton med Hvid Portland cement og Asnæs flyveaske er:

$$D = 2.16 \cdot \ln(t) - 5.71 \quad (6.23)$$

Ligningerne gælder for betoner op til en alder på 500 døgn efter blanding, og der er opnået korrelationskoefficienter mellem 0.95 og 0.99.

6.11 DEN DANSKE BETONNORMS BEGRÆNSNINGER

På basis af de her foreliggende forsøgsresultater kan det konstateres, at den danske betonnorms begrænsninger for brug af flyveaske i beton ikke kan begrundes i hensyn til sådanne betoners styrkeniveau eller styrkeudvikling. Flyveaskes virkning kan tilsyneladende ikke beregnes på basis af teorier, som er baserede på kemisk beregning af den mængde calciumhydroxyd, der er nødvendig, for at pozzolanreaktionerne skal kunne forløbe til ende. Selv efter 500 døgns vandlagring og ved brug af mere end 90% flyveaske i forhold til den samlede mængde cement plus flyveaske, fortsætter flyveasken med at bidrage til betonens styrke og styrkeudvikling.

Muligvis skyldes denne fortsatte styrkeudvikling hos betonen, at flyveaskepartiklerne deler den mængde calciumhydroxyd, der er tilstede i blandingen, og at de enkelte flyveaskepartikler ikke nødvendigvis behøver at reagere fuldstændigt med calciumhydroxyd for i væsentlig grad at bidrage til betonens styrkeudvikling.

Set fra et styrkemæssigt synspunkt synes normens begrænsning på maksimalt 35% flyveaske, regnet i forhold til den samlede mængde cement plus flyveaske i betonen, derfor ikke at være begrundet. Enten er der calciumhydroxyd nok i beton, således at flyveasken kan reagere med væsentlig større mængder flyveaske, end de i normen antagne 35%, eller også foregår der andre kemiske reaktioner i flyveaskebeton, end de reaktioner man sædvanligvis forestiller sig.

7 KLORIDINDTRÆNGNING I FLYVEASKEBETON

7.1 GENERELT OM KLORIDINDTRÆNGNING I BETON

Ved projektering af enhver betonkonstruktion forsøger man at skønne eller beregne, hvilke miljøpåvirkninger konstruktionen vil blive udsat for både i byggeperioden og under senere brug. Samtidig søger man at vurdere, hvilken grad af vedligeholdelse, der vil være nødvendig, for at konstruktionen skal kunne opnå den ønskede levetid.

Når det drejer sig om betonkonstruktioner, har man ikke tidligere lagt nogen større vægt på levetidsberegninger, dels fordi man har betragtet beton som et vedligeholdelsesfrit materiale med "uendelig" lang levetid; men også fordi man ikke har været i besiddelse af den nødvendige erfaring og viden om de faktorer, der påvirker betonens levetid. De seneste årtier har imidlertid vist, at beton hverken er et uforgængeligt eller et vedligeholdelsesfrit materiale.

En af betonens værste fjender er korrosion af indstøbte armeringsjern. Sådant korrosion medfører, at armeringsstålet omdannes til mere voluminøse produkter. Resultatet af denne omdannelse giver i bedste fald anledning til afsprængning eller afskalning af dæklaget over armeringen, medens korrosionen i værste fald medfører, at konstruktionen mister sin bæreevne og styrter sammen.

7.1.1 Korrosion af armeringsjern

Normalt er armeringsjern, der er indstøbt i beton, beskyttede mod korrosion på grund af betonens høje alkalinitet. Jernet er passiveret, og set fra et termodynamisk synspunkt er aktiv korrosion af armeringsjernene ikke mulig. Der er to væsentlige årsager til, at denne passivering af jernet kan nedbrydes, nemlig:

- 1) Karbonatisering af beton
- 2) Kloridindtrængning i beton

Ad 1) Karbonatisering af beton foregår ved, at atmosfærens kuldioxid trænger ind i betonen og reagerer med den kalciumhydroxid, der er dannet ved hydratisering af cementen, og som indgår i cementpastaens struktur. Herved reduceres betonens pH-værdi. Dette medfører, at jernet bringes i en tilstand, som kan give anledning til korrosion, hvis der er vand og ilt tilstede. For helt tør beton er situationen ufarlig, fordi omdannelse af stål til korrosionsprodukter kræver tilstedeværelse af vand; og i meget våd beton eller beton, som er neddykket i vand, går karbonatiseringen i stå, fordi diffusionshastigheden af kuldioxid i vand er meget lille, eller fordi der mangler ilt til korrosionsprocessen. Det er altså beton, som tidvis udsættes for udtørring og opfugtning, der er i farezonen med hensyn til armeringskorrosion som følge af karbonatisering af betonen i dæklaget over armeringen.

Karbonatisering af beton er en velkendt proces. Den foregår meget langsomt i konstruktionsbeton. I den foreliggende rapport skal vi ikke beskæftige os nærmere med armeringskorrosion som følge af karbonatisering af beton.

Ad 2) Korrosion af armeringsjern i beton, som skyldes tilstedeværelse af kloridioner, er en langt mere kompliceret, alvorligere og mindre kendt proces. Klorider i betonen kan både stamme fra selve betonen, eller de kan være tilført fra omgivelserne i form af tøsalte, havvand eller havgus.

Betonens eget indhold af klorider stammer som regel fra de delmaterialer og tilsætningsstoffer, der er brugt ved fremstilling af betonen. Derfor har de fleste lande indført regler for hvor meget klorid, der må tilføres betonen gennem delmaterialerne. Den danske betonnorm, DS 411[3] kræver således:

"det totale indhold af opløselige klorider, beregnet som vandfrit kalciumklorid, må ikke overstige følgende andele af cementvægten:

*0.5 pct i slapt armeret beton i aggressivt miljø og i spændbeton,
1.5 pct i anden slapt armeret beton og
2.5 pct i uarmeret beton."*

Dette er meget lempelige krav. Måske for lempelige!

Kloriderne kan imidlertid også trænge ind i betonen fra omgivelserne. Således vil klorider fra havvand eller tøsalte efterhånden trænge ind i enhver beton. Når tilstrækkelig store mængder af kloridioner når frem til armeringen, vil den beskyttende oxidfilm på jernenes overflader nedbrydes, og der opstår lokalt områder på armeringsjernenes overflader, hvor korrosionshastigheden kan blive meget høj, såkaldt grubetæring.

Forløbet af armeringskorrosion i beton, som forårsages af indtrængende kloridioner, kan anskueliggøres ved hjælp af figur 7.1.

Figuren viser, at der sker en gradvis indtrængning af kloridioner i beton fra påvirkningens begyndelse t_0 til det tidspunkt t_i , hvor korrosionen starter. Denne periode kaldes for initieringstiden. I initieringsperioden er armeringen stadig beskyttet mod korrosion. Til tiden t_i er koncentrationen af kloridioner ved armeringsjernenes overflader imidlertid blevet tilstrækkelig høj til at depassivere jernene, og korrosionen begynder. Når korrosionen først begynder, vil den fortsætte med stort set konstant hastighed, så længe miljøbetingelserne er uforandrede. En vis tid t_1 efter at korrosionen er begyndt, vil den give anledning til revner og afskalninger af dæklaget over jernene. Til slut kan konstruktionen helt miste sin bæreevne og i værste fald styrte sammen.

Konstruktionens samlede levetid kan derfor udtrykkes som summen af initieringstiden og korrosionstiden. I praksis er det næppe forsvarligt at acceptere nogen som helst form for aktiv korrosion, og konstruktionens levetid bør ikke regnes højere end initieringstiden, således som det er påpeget af Fagerlund [45]:

"For armering i bärande konstruktioner bör man af säkerhedsskäl aldrig acceptera att korrosion fortgår. Dels är tiden från korrosionsstart till oacceptabel korrosionsskada ofta kort, dels kan ibland mycket stor korrosion ske, utan att detta kan observeras okulärt. Riskerna är speciellt stora vid spännbetongkonstruktioner."

Ved vurdering af en armeret betonkonstruktions levetid er det derfor væsentligt, at man kan bestemme initieringstiden. Den afhænger dels af en såkaldt **tærskelværdi** for den kloridionkoncentration, der giver anledning til begyndende armeringskorrosion, dels af **betonens modstandsdygtighed over for indtrængning af kloridioner**.

7.1.2 Tærskelværdi for kloridionkoncentration med hensyn til initiering af armeringskorrosion

Tærskelværdien for armeringskorrosion angiver den kloridkoncentration, der er nødvendig for at nedbryde den passiverende film på armeringjernenes overflader. Der er i tidens løb udført mange undersøgelser for at fastlægge den maksimalt tilladelige koncentration af klorid i beton, men dette er endnu ikke lykkedes.

I adskillige undersøgelser antages, at den tærskelværdi for kloridionkoncentration, som er nødvendig for at starte korrosionsprocessen i beton, kan udtrykkes som forholdet mellem koncentrationen af klorid- og hydroxylioner i betonens porevæske. Et typisk bud på denne grænseværdi, udtrykt som Cl/OH^- forholdet, ligger omkring 0.6.

Der eksisterer næppe nogen generel maksimalt tilladelig kloridionkoncentration, som gælder for alle betoner og miljøforhold. Dette er påpeget af Hansson [46]:

"There is no unique threshold value of chloride concentration in concrete for the initiating of pitting. The higher the electrochemical potential and the lower the pH, the less chloride is needed for corrosion to start."

Koncentrationen af kloridioner, jernets elektriske potentiale og betonens pH værdi er næppe de eneste faktorer, der påvirker tærskelværdien. Ved undersøgelser af stålfiberarmeret beton har Mangat og Gurusamy [47] således fundet, at indstøbte stålfibre ikke korroderer selv ved kloridionkoncentrationer på 4 vægtprocent af cementmassen eller ved Cl/OH^- forhold på 320.

Det må således konstateres, at der endnu hersker uklarhed med hensyn til den tærskelværdi, der skal overskrides, før kloridioner kan nedbryde oxidfilmen på armeringsjernenes overflade.

7.1.3 Betons tæthed over for kloridindtrængning

Indtrængning af kloridioner i beton og opbygning af den nødvendige kloridionkoncentration for initiering af armeringskorrosion er dels afhængig af, hvor hurtigt kloridionerne kan transporteres, dvs. diffunderes i betonen. Dels er indtrængningshastigheden afhængig af, hvor megen klorid der bindes i betonen. Nogle af de kloridioner, som trænger ind i beton eller i cementpasta, vil nemlig ikke være frie til at bevæge sig frem til armeringen. Inden de når armeringen, bindes en del af ionerne ved en kemisk reaktion med den hydratiserende cement, medens andre kloridioner adsorberes til overfladen af cementgelpartiklerne. Sådanne bundne kloridioner medvirker ikke til opbygning af den nødvendige koncentration for korrosion på armeringsjerns overflader.

Hvor meget klorid, der kan bindes på denne måde, beror blandt andet på cementens klinkermineralsammensætning. De fleste undersøgelser viser, at de væsentligste bindinger sker til den hærdnede cements C_3A -fase, men der er også rapporteret om bindinger til C_4AF - og C_3S -faserne. [48], [49], [50], [51]. Mængden af kloridioner, der bindes, er også afhængig af, hvilken kation kloriden er forbundet med i det indtrængende eller det tilstedeværende salt [52]. Dog bør det påpeges, at indtrængning af kloridioner og opbygning af den nødvendige kloridkoncentration for initiering af korrosion er bestemt af betonens tæthed, snarere end af den kemiske bindingskapacitet af kloridionerne til cementgelen [53].

Litteraturen vedrørende diffusion af klorid i beton og cementpasta er ikke særlig klar, fordi der sjældent skelnes mellem diffusion med og uden binding af kloridioner i gelstrukturen. En af årsagerne til den manglende adskillelse er blandt andet de to principielt forskellige måle- og beregningsmetoder, der bruges i forbindelse med undersøgelse af kloriddiffusion i cementbundne materialer.

Langt de fleste undersøgelser af kloriddiffusion og de faktorer, der påvirker sådan diffusion, er foretaget på prøvelegemer af mørtel eller pasta, snarere end på beton. Typisk måles kloridiondiffusionen gennem en tynd pastaskive, hvor der er etableret en forskel i kloridkoncentration mellem skivens over- og underside. Efter en vis tid opnås en tilnærmelsesvis stationær transport af kloridioner gennem skiven. Det registreres så, hvor store mængder kloridioner, der passerer skiven som funktion af den forløbne tid. Undersøgelser af denne type viser som regel, at kloridionerne trænger gennem mørtlen eller pastaen i overensstemmelse med den simplest mulige lov for diffusion, nemlig Fick's første lov for endimensional diffusion i faste stoffer, der er vist i ligning (7.1)

$$g_k = -D_k \frac{dC}{dx} \quad (7.1)$$

hvor g_k = kloridflux; dvs. mængden af kloridioner, der passerer et enhedsareal af stoffet per tidsenhed, ($\text{g}/\text{mm}^2 \cdot \text{år}$)

C = kloridionkoncentration, (g/mm^3)

x = stedkordinat, (mm)

D_k = diffusionskoefficient for kloridioner, ($\text{mm}^2/\text{år}$)

Brug af Fick's første lov til vurdering af kloridiondiffusion forudsætter altså, at transport gennem prøven er stationær, dvs. at der ikke sker nogen binding af kloridioner til cementgelpartiklerne under forsøget. Diffusionskoefficienten for kloridioner, D_k , kan direkte bestemmes ved hjælp af ligning 7.1, når kloridfluxen og koncentrationsforskellen mellem de to flader af prøvelegemet er kendte.

I andre undersøgelser benyttes en målemetode, som udover den egentlige transport af kloridioner i betonen, også tager hensyn til akkumulering af klorid i beton eller pasta som følge af kloridionernes binding til cementgelen. Ved disse undersøgelser foregår diffusionen typisk fra en vandig kloridopløsning ind i cementpastaen eller betonen. Efter en vis tid måles kloridionkoncentration i forskellige afstande fra overfladen. Alternativt måles den maksimale indtrængningsdybde af kloridioner. Når det diffunderende medium, som her er klorid, akkumuleres i betonen igennem måleperioden, opnås der ikke nogen stationær transport af klorid, og gradienten dC/dx og dermed fluxen g_k ændrer sig med tiden. I de fleste sådanne undersøgelser finder man derfor, at kloridindtrængningen er i bedre overensstemmelse med Fick's anden lov, der fremgår af ligning (7.2) for et halvuendeligt medium.

$$\frac{dC}{dt} = D_k \frac{d^2C}{dx^2} \quad (7.2)$$

Løsningen til Fick's anden lov kan udtrykkes ved hjælp af fejlfunktionen $\text{erf}(y)$, som vist i ligning (7.3)

$$\frac{C_{(x,t)} - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{(D_k \cdot t)}} \right] \quad (7.3)$$

hvor $C_{(x,t)}$ = koncentration af kloridioner i afstand x fra overfladen til tiden t , (g/mm^3)
 C_s = konstant kloridkoncentration ved prøvelegemets overflade, (g/mm^3)
 C_0 = oprindelig kloridkoncentration i betonen, (g/mm^3)
 t = tidsperiode i hvilken betonen har været udsat for kloridpåvirkning udefra, (år)
 D_k = diffusionskoefficient for kloridioner, ($\text{mm}^2/\text{år}$)
 $\text{erf}(y)$ = fejlfunktionen.

Fejlfunktionen $\text{erf}(y)$, som også kaldes for det normaliserede sandsynlighedsintegrale eller Gauss fejlfunktion, er givet ved følgende ligning:

$$\text{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-z^2} dz \quad (7.4)$$

Fejlfunktionen er tabuleret i matematiske tabelværker [56].

Hvis betonens oprindelige indhold af klorid er meget lille, reduceres ligning 7.3 til:

$$C_{(x,t)} = C_s - C_s \cdot \text{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{(D_k \cdot t)}} \right] \quad (7.5)$$

Det ses af ligning (7.5), at koncentrationen af kloridioner i en given dybde af et prøvelegeme og efter en given tid varierer lineært med fejlfunktionen. Både den tilsvarende kurves hældning og skæring med abscisseaksen i et $(x, C_{(x,t)})$ koordinatsystem er lig med C_s . Hvis C_s og $C_{(x,t)}$ er kendte størrelser, kan D_k bestemmes ved hjælp af tabelværker over fejlfunktionen.

Flere forskere [57], [58], [59] har påpeget, at der ved beregning af den maksimale indtrængningsdybde x_{\max} , svarende til at ionkoncentrationen netop er "nul", kan benyttes en tilnærmet løsning til Fick's anden lov. Denne løsning fremgår af ligning 7.6.

$$x_{\max} = 4\sqrt{(D_k \cdot t)} \quad (7.6)$$

hvor x_{\max} = dybde i betonen, hvor koncentrationen af klorid er faldet til 5 promille af kloridionkoncentrationen ved prøvelegemets overflade, (mm)

t = tid, (år)

D_k = diffusionskoefficient, (mm²/år)

Den tilnærmede løsning fås ved at sætte $C_{(x,t)}/C_s = 0.005$ i ligning 7.5, svarende til, at den maksimale indtrængningsdybde regnes lig med det sted i betonen eller pastaen, hvor koncentrationen af kloridioner er faldet til 5 promille af kloridionkoncentration ved prøvelegemets overflade. Tabeller over fejlfunktionen $\text{erf}(y)$ viser nemlig, at y omtrent skal have værdien 2 for at udtrykket $(1-\text{erf}(y))$ skal være lig med 0.005.

Uanset hvilken undersøgelsesmetode der benyttes, og uanset om der bruges pasta, mørtel eller beton, afhænger diffusionskoefficienten D_k af følgende parametre:

- 1) v/c forholdet.
- 2) cementens type og finhed.
- 3) lagringsmetode, tid og temperatur.

Andre parametre kan dog også påvirke størrelsen af D_k . Det bør således nævnes, at flere undersøgelser tyder på, at D_k udover de tre ovennævnte parametre også afhænger af de benyttede kloridsalte [60, 61, 62]. Det er f.eks. fundet, at D_k for kloridioner fra CaCl_2 er dobbelt så stor, og fra MgCl_2 omkring 3-4 gange så stor, som for kloridioner fra NaCl .

Den absolutte værdi af D_k er således afhængig af mange materialeparametre. Desuden er den afhængig af den benyttede målemetode. For almindelig beton viser det sig imidlertid, at den altid er af størrelsesordenen 10^{-8} cm²/s, eller hvad der omtrent er det samme, 30 mm²/år.

7.1.4 Flyveaskes virkning på kloridindtrængning i beton.

Når der tilsættes flyveaske til beton, påvirkes alle betonens egenskaber. Dette gælder også de faktorer, der har betydning for betonens tæthed over for kloridindtrængning og dermed for korrosion af indstøbte armeringsjern.

Flere forskere har således rapporteret, at tilsætning af flyveaske til cementpasta forøger pastaens elektriske modstandsevne, og at dette virker bremsende på korrosion af armeringsjern i pastaen.

I litteraturen har der imidlertid også været udtrykt frygt for, at flyveaskens forbrug af hydroxylioner i beton skulle reducere alkaliniteten i pastaen så meget, at der kunne ske en depassivering af armering. Der er imidlertid aldrig rapporteret om nogen målelig depassivering af armering alene på grund af pozzolanreaktion i flyveaskebeton. Diamond [54] har da også påvist, at frygten for, at den passiverende effekt skulle forsvinde på grund af flyveaskens reaktion med hydroxylioner, er ubegrundet. Med to danske flyveasker har Diamond nemlig fundet, at den høje alkalinitet i beton i højere grad skyldes tilstedeværelsen af natrium- og kaliumioner end hydroxylioner.

Der er udført mange laboratorieforsøg med formål at undersøge flyveaskes virkning på klorid-indtrængning i beton. Næsten alle forsøg er imidlertid udført med cementpasta, hvor en større eller mindre del af cementen er blevet erstattet med flyveaske. De fleste af disse undersøgelser viser, at jo mere flyveaske der bruges, og jo længere og jo vådere pastaen lagres, før den udsættes for klorid, desto tættere bliver cementpastaen. Flyveaskes positive virkning på cementpastas tæthed over for kloridioner forklares ofte i litteraturen ud fra en formodning om, at pasta, som fremstilles med flyveaske, opnår en finere og tættere porstruktur end tilsvarende pasta, som fremstilles uden flyveaske. Det antages, at den fine og tætte porestruktur skyldes, at reaktionsprodukterne fra den kemiske reaktion mellem flyveaske og hydroxylioner blokerer eksisterende kanaler i pastaen.

Hansson, Strunge, Markussen og Frølund [63] har undersøgt virkningen af forskellige cementtyper på diffusionshastigheden af kloridioner i cementpasta som funktion af v/c -forhold, hærdetid og eksponeringstemperatur. Disse forskere anvendte til forsøget dansk Standard cement med 22% flyveaske, dansk Rapidcement (RHPC) med 3% flyveaske og dansk Lavalkali, sulfatbestandig cement uden flyveaske (SRPC). Resultatet af undersøgelsen er vist i tabel (7.1). Det fremgår, at den væsentligste parameter for kloriddiffusion er pastaens v/c forhold, og at den største effekt af længere vandlagringstid opnås med flyveaskecement. Dette tilskrives pozzolanreaktion. Forfatterne konkluderer desuden, at cementens finhed har stor betydning for pastas tæthed overfor indtrængning af kloridioner.

Page, Short og Holden [64] har også undersøgt forskellige cements indflydelse på kloridion-diffusion i pasta. De har benyttet to almindelige portlandcementer (OPC A og OPC B) og en sulfatbestandig cement (SRPC). Den ene af de almindelige portlandcementer er desuden brugt sammen med henholdsvis 30% flyveaske og 65 % granuleret højovnsslagge. Resultatet af disse undersøgelser er vist i tabel 7.2. I tabellen er, foruden numeriske værdier for diffusionskoefficienterne, også vist Cl/OH forhold og de korrosionshastigheder, der er målt på indstøbt stål. Korrosionshastighederne er angivet ved strømstyrken I_{corr} . Det fremgår af resultaterne i tabel 7.2, at et indhold på 30% flyveaske i pasta reducerede diffusionskoefficienten for kloridioner fra omkring $4.5 \cdot 10^{-8}$ til $1.5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$. Højovnsslagge var imidlertid endnu mere effektiv som tilsætningsstof, idet sådan slagge reducerede diffusionskoefficienten til ca. $0.4 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sek}$.

Også Byfors [65] har undersøgt flyveaske indvirkning på diffusion af kloridioner i cementpasta. Byfors har i sin undersøgelse brugt almindelig Portland cement (OPC), mikrosilika [CSF] og to forskellige slags flyveaske (PFA 1 og PFA 2). Resultatet af denne undersøgelse er vist i tabel 7.3 og figur 7.2. Det fremgår af Byfors resultater, at diffusionskoefficienten for klorid i cementpasta falder drastisk med stigende flyveaskeindhold og med faldende vand/bindemiddel forhold (w/b). Byfors fandt i øvrigt, at tilsætning af flyveaske ikke reducerer alkaliniteten i pasta så meget, at jernet depassiveres jvf. tabel 7.4. Mikrosilika har også en positiv virkning på kloridiondiffusionen, men en behandling af dette emne ligger uden for den foreliggende undersøgelses rammer.

Li og Roy [66] har studeret sammenhængen mellem porøsitet, porestruktur og kloriddiffusion i flyveaskepasta ved at måle den elektriske ladning, der kan bringes til at passere en 5 cm tyk pastaskive, over hvilken der er lagt en elektrisk spænding på ca. 60 volt. Den passerede ladning antages at være proportional med kloridiondiffusionen gennem skiven. I undersøgelsen har Li og Roy fundet, at, hvad de kalder diffusionskoefficienten for kloridioner, er en størrelsesorden lavere i alle flyveaskeblandinger end i lignende blandinger, som er fremstillet uden flyveaske. Med stigende flyveaskemængde og faldende v/c- forhold reduceres kloridiondiffusionen stærkt, selv om pastaens porøsitet, som målt ved kviksølvporøsimetri, øger. Li og Roy påpeger i deres undersøgelse, at kloridiontransport både er afhængig af pastaens kemiske sammensætning og dens fysiske struktur. Konklusionen af undersøgelsen er, at jo mere flyveaske, der tilsættes en Portland cement, desto bedre bliver pastaens kvalitet med hensyn til modstandsevne mod kloridindtrængning. Undersøgelserne er gennemført med op til 40% tilsætning af flyveaske i vægtprocent af cementen. Li og Roy postulerer, at flyveaskens forbedrede virkning med hensyn til kloridiondiffusion i pasta skyldes følgende tre faktorer:

- 1) pozzolanreaktion, som medfører tilstopning af porerne i cementpasta.
- 2) tilstedeværelsen af flyveaske, som medfører, at poresystemet i cementpasta får et mere snørklet og kringlet forløb, der forsinker diffusion af fremmede stoffer i pastaen.
- 3) kloridiontransport i flyveaskepasta bremses på grund af påvirkning fra fler-valente kationer i porevæskeopløsningen.

Mangat og Gurusamy [47] har undersøgt diffusion af klorid i stålfiberarmeret beton, som var tilsat flyveaske. Proportionering af de undersøgte betoner blev foretaget ved hjælp af en modificeret erstatningsmetode, hvor den tilsatte flyveaskemængde er større end den cementmængde, der fjernes. I modsætning til andre forskere fandt Mangat og Gurusamy, at flyveaske reducerer tæthed af beton over for kloridiondiffusion sammenlignet med tilsvarende almindelig beton. Ved undersøgelsen er der imidlertid benyttet luftlagrede prøver. Dette er formentlig forklaringen på den dårligere tæthed af flyveaskebetonen. Mangat og Gurusamy's undersøgelse støtter på dette punkt den almindelige opfattelse af, at lagringsforholdene er langt vigtigere for flyveaskebeton, end for almindelig beton som fremstilles uden tilsætning af flyveaske.

Der er store problemer forbundet med at overføre resultater fra forsøg med cementpasta til konstruktionsbeton på grund af forekomsten af inhomogeniteter i beton. Desuden savnes undersøgelser af flyveaske virkning på tæthed af beton for et bredt spektrum af c/v -forhold og flyveaskeindhold.

Den danske betonnorm indeholder, foruden krav til konstruktionsbetons v/c -forhold og styrke for forskellige miljøklasser (tæthedskrav), også et krav til kemisk beskyttelse af armeringen. I vejledningen til DS 411 [5] anføres således, at der maksimalt må tilsættes 35% flyveaske til armeret beton, regnet i vægtprocent af den samlede vægt af cement plus flyveaske.

Grunden til, at der i henhold til den danske betonnorm ikke må bruges mere end de ovennævnte 35 procent flyveaske, er en hypotetisk risiko for korrosion af armeringsjern. Teoretiske beregninger viser nemlig, jfr. afsnit 6.11, at fuldstændig reaktion af ca. 35% flyveaske med den tilstedeværende calciumhydroxyd er ensbetydende med, at alle hydroxylioner i betonen opbruges. Derved skulle armeringsjernene depassiveres. Som nævnt i afsnit 6.11 er det dog usikkert, om denne teoretiske grænse for betonens flyveaskeindhold er rimelig. Der mangler nemlig eksperimentel dokumentation for, at den valgte grænse for det maksimalt tilladelige flyveaskeindhold på 35% i beton er berettiget. Desuden mangler der dokumentation for, at normens krav til ækvivalent v/c -forhold for aggressivt og moderat miljø er korrekte, når k_a , som angivet i anvisningen, sættes til 0.5 jfr. ligning 4.1 i kapitel 4.

7.2 FORSØGSPLAN

Hensigten med den her foreliggende del af projektet er at sammenligne diffusionshastigheden af kloridioner i betoner, der er fremstillet med forskellige c/v - og f/v - forhold. Kloridiondiffusionen måles indirekte ved hjælp af en elektrokemisk metode, som tidligere er beskrevet af Hansson [46]. Baggrunden for målemetoden er omtalt i afsnit 7.3.

Initieringstiden for korrosion af armeringsjern bestemmes i en lang række forskellige betoner, der er fremstillet både med og uden flyveaske. Initieringstiden er afgørende for betonens levetid med hensyn til armeringskorrosion. Som nævnt i afsnit 7.1.1, bør betons levetid ikke regnes længere end initieringstiden for korrosion. I initieringstiden indgår både binding af klorider i cementpastaen, og den tid det tager at opbygge den kloridkoncentration, som er nødvendig for at initiere armeringskorrosion.

Et af de væsentligste formål med undersøgelsen er at fastlægge, hvorvidt den danske betonnorms mængdemæssige grænser for anvendelse af flyveaske er berettigede af hensyn til risikoen for armeringskorrosion i beton, eller om disse grænser bør revideres.

For at sætte de i dette projekt målte indtrængningstider for kloridioner i relation til resultaterne af andre undersøgelser, er der udregnet en diffusionskoefficient for kloridtransport i de undersøgte betoner ved hjælp af den tidligere omtalte tilnærmede løsning til Ficks anden diffusionslov:

$$x_{\max} = 4\sqrt{(D_k \cdot t)} \quad (7.6)$$

hvor x_{\max} = dybde i betonen, hvor koncentrationen af klorid er faldet til 5 promille af kloridionkoncentrationen ved prøvelegemets overflade, (mm).

t = tid, (år)

D_k = diffusionskoefficient, (mm²/år).

Når dæklagets tykkelse og initieringstiden er kendte størrelser, kan betonernes diffusionskoefficienter udregnes ved hjælp af ligning (7.6).

I en tidligere undersøgelse, som er udført ved LBM af Hansen, Jensen og Johannesson [67], fandt man, at diffusionskoefficienten for flyveaskebeton tilsyneladende kunne bestemmes ved hjælp af en ligning, som i modificeret form er vist i ligning (7.7).

$$D_k = \exp^{A_2 \cdot \left[\frac{c + k_d \cdot f}{v} \right] + E_2} \quad (7.7)$$

hvor D_k = diffusionskoefficient for kloridioner, (mm²/år).

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

A_2 og E_2 = konstanter, der er afhængige af betonens sammensætning, lagringsforhold og alder.

k_d = aktivitetsfaktor for flyveaske med hensyn til kloridiondiffusion.

I det foreliggende projekt har forfatteren undersøgt, om diffusion af kloridioner i flyveaskebeton generelt kan udregnes ved hjælp af ligning (7.7), hvor flyveaskens bidrag til betonens tæthed med hensyn til kloridindtrængning fremgår af flyveaskens aktivitetsfaktor k_d .

Undersøgelsen af kloridioners indtrængning i beton er foretaget i direkte fortsættelse af de i kapitel 6 beskrevne styrke- og bearbejdelighedsundersøgelser af flyveaskebeton. Prøvelegemerne til kloridindtrængningsforsøgene er udstøbt af samme betonblandinger, som blev brugt i forbindelse med styrkeundersøgelsen.

Af de fire serier beton, som er beskrevet i kapitel 6, og som hver består af 27 forskellige betonblandinger, udstøbtes tre prøvelegemer af hver blanding indeholdende ialt ni armeringsjern.

7.3 MATERIALER

7.3.1 Cement, flyveaske, tilslag og tilsætningsstof

Betonerne fremstilles med samme delmaterialer, som beskrevet i afsnit 6.6.

7.3.2 Armeringsjern

Der er fremstillet 882 armeringsjern af blødt automatstål med diameter på 10 mm og længde på 150 mm. I hver ende af jernene er drejet et indvendigt gevind. Til fastholdelse af jernene under udstøbningen er fremstillet 18 koniske plastikmuffer med indvendigt gevind, som vist i figur 7.3.

7.3.3 Støbeforme

Ved fremstilling af prøvelegemer til disse forsøg benyttes et sæt på tre kubiske terningforme 200 x 200 x 200 mm. Af hensyn til den begrænsede lagringskapacitet ved den senere kloridprøvning, er formene forsynet med stålindlæg, således at størrelsen af de udstøbte prøvelegemer reduceres til 200 x 120 x 60 mm. I to modstående sider af hver terningform er udboret huller til montering af armeringsjern med tilhørende plastikmuffer. Desuden er bunden af formene foret med 0.5 mm teflon for at opnå en ensartet jævn betonoverflade uden brug af formolie.

Armeringsjernene slibes med smergellærred, til de får en ensartet og blank overflade. Derefter affedtes jernene i acetone. Til sidst skylles de i rindende vand. De rensede jern forsynes med plastikmuffer og spændes fast i terningsformene, som vist i figur 7.4. Dæklagstykkelsen over armeringsjernene er 15 mm, og denne tykkelse sikres ved hjælp af afstandsklodser, som fjernes umiddelbart før udstøbning af betonen.

7.4 PROPORTIONERING OG STØBNING

Betonerne er proportioneret efter den udvidede DOE-metode, der er beskrevet i afsnit 6.1. Blanderecepter samt de friske og de hærtnede betoners egenskaber fremgår af tabellerne 6.4 til 6.6 og af figurene 6.11 til 6.14.

Af hver blanding er udstøbt tre terninger med ialt 9 armeringsjern efter følgende procedure:

- 1) Betonen fyldes i formen i tre omgange til en højde af ca. 60 mm, idet der tilstræbes en omhyggelig udfyldning under hvert armeringsjern.
- 2) Formene vibreres i 15 sek. på et vebebord.
- 3) Betonoverfladen afdækkes med polyethylenfolie, og terningerne henstår indtil de efter ca. 20 timers forløb forsigtigt afformes.

Umiddelbart efter afformningen trækkes plastikmufferne ud af betonen, og med en bolt og en ledning etableres elektrisk kontakt til den ene ende af hvert af de indstøbte armeringsjern. Hullerne fra plastikmufferne udstøbes derefter med en hurtighærdnende epoxylim, og for at sikre tæt kontakt mellem epoxy og beton udsættes de epoxyudstøbte huller kortvarigt for et tryk på 100 Torr. Efter udstøbning af epoxymassen vandlagres prøverne ved 20°C, indtil det første

prøvelegeme i hvert sæt efter 14 døgns vandlagring nedsænkes i en 10% opløsning af NaCl i almindeligt postevand. Det andet prøvelegeme i hvert sæt nedsænkes i NaCl-opløsningen efter 28 døgns vandlagring, og det tredje efter 56 døgns vandlagring.

7.5 EKSPERIMENTIELLE METODER

7.5.1 Metode til måling af initieringstiden for armeringskorrosion.

Som nævnt er de 4 x 27 betonblandingers initieringstid overfor kloridindtrængning målt på prøvelegemer efter vandlagring i 14, 28 og 56 døgn. Initieringstiden er betegnelsen for den tid der går fra prøvelegemet nedsænkes i NaCl-opløsningen, indtil kloridionerne er trængt frem til det indstøbte armeringsjern og har startet korrosionsprocessen. Begyndelsestidspunktet for korrosionsprocessen bestemmes ved hjælp af en elektrokemisk metode, der bl.a. er beskrevet af Hansson [46]. Det er en relativ simpel, men sikker målemetode til at bestemme initieringstiden for armeringsjern i beton, som er helt eller delvis nedsænket i en kloridholdig opløsning. Metoden er specielt velegnet til at sammenligne initieringstider for stål, som er indstøbt i forskellige betoner. Målemetoden og baggrunden for denne er kort skitseret nedenfor, hvorimod den grundlæggende korrosionsteori og de elektrokemiske grundbegreber kan studeres i f.eks. [97] og [98].

Et armeringsjern, der er indstøbt i beton, vil altid søge mod sin laveste energitilstand, og da den frie energi for korrosionsprodukterne er mindre end energien i det rene jern, vil jernet omdannes til rust, som produktet af processen populært kaldes. Omdannelsen sker ved en elektrokemisk proces, der, som vist i ligning 7.8 og ligning 7.9, kan opdeles i en anodeproces og en katodeproces. Ved anoden oxideres jernet til jernioner plus elektroner, og disse elektroner forbruges sammen med vand ved reduktion af ilt ved katoden under dannelse af hydroxylioner.



Da der deltager elektriske ladninger i begge processer, kan reaktionshastigheden teoretisk udtrykkes ved en strømstyrke. For et givet system, som f.eks. jern indstøbt i beton, vil der være entydig sammenhæng mellem jernets elektriske potentiale og korrosionshastigheden. Sammenhængen mellem et materiales elektriske potentiale og korrosionshastigheden kan afbildes i såkaldte polarisationskurver. I figur 7.5a er jerns polarisationskurve skitseret, og i figur 7.5b er polarisationskurven for ilt skitseret. Da de elektrokemiske processer i princip er reversible, har de skitserede polarisationskurver i figur 7.5a-b både en oxidationsgren (a) og en reduktionsgren (b). For armeringsjern indstøbt i beton vil jernet imidlertid blive oxideret med iltreduktion som den mest almindelige katodeproces. Dette er skitseret i figur 7.6a. Denne korrosionsproces vil foregå ved potentialet E_{kor} og forløbe med hastigheden i_{kor} , svarende til skæringspunktet mellem oxidationskurven for jern og reduktionskurven for ilt. Korrosionshastigheden i_{kor} er imidlertid

meget lille, fordi jern, der er indstøbt i beton, normalt er beskyttet af det basiske miljø i betonen. Jernet passiveres af en tynd beskyttende oxidfilm på overfladen. Det er denne passivering, der giver jerns polarisationskurve dens karakteristiske forløb.

Ved kloridindtrængning sker der imidlertid en kraftig miljøændring på overfladen af armeringsjernet, og den passiverende film nedbrydes. Denne miljøændring medfører en ændring af jernets polarisationskurve, som det f.eks. er beskrevet af Page [68] og skitseret i figur 7.6b. Herved flyttes skæringspunktet mellem jernets og iltens polarisationskurver, og korrosionsprocessen vil nu forløbe ved et lavere potentiale (E_{kor}) og med langt større hastighed (i_{kor}). Det er netop denne ændring i jernets polarisationskurve, der ligger til grund for den benyttede elektrokemiske målemetode til fastlæggelse af betonernes initieringstid overfor klorid-fremkaldt armeringskorrosion.

Korrosionsprocessen er som nævnt altid en dobbeltreaktion, dvs. en oxidation og en reduktion. For at kunne bestemme korrosionshastigheden, eller i dette tilfælde blot en ændring i korrosionshastigheden af det instøbte armeringsjern, er det nødvendigt, at de to reaktioner foregår ved hver sin elektrode. Derfor må forsøgsopstillingen bestå af mindst to elektroder, nemlig en arbejds elektrode, hvor oxidationsreaktionen foregår, og en hjælpeelektrode, hvor reduktionsreaktionen foregår. For at kunne måle korrosionsspændingen har man brug for et voltmeter, som kobles mellem arbejds elektroden og en tredje elektrode, kaldet referenceelektroden. Som referenceelektrode benyttes en calomel elektrode. Alle elektrokemiske målemetoder for bestemmelse af korrosionshastigheden bygger på samme princip. Man påtrykker en elektrisk spænding og registrerer virkningen på systemet. For at kunne påtrykke systemet en spænding har man imidlertid brug for en spændingskilde, som eventuelt kunne være et batteri. Et batteri har imidlertid den ulempe, at den påtrykte spænding falder med tiden. Man har derfor udviklet et specielt apparatur til dette formål, som kaldes en potentiostat. Selve målingen foregår ved, at der påtrykkes systemet en spænding, og den tilsvarende strøm måles. En ændring af strømmen indikerer en miljøændring ved det indstøbte armeringsjern, som skyldes de indtrængende kloridioners nedbrydning af den passiverende film på jernets overflade.

Ved korrosionsprocessen er hastigheden, hvormed elektroner afgives i henhold til ligning (7.8), imidlertid altid lig med den hastighed, hvormed elektronerne forbruges i henhold til ligning (7.9). Der løber derfor ikke nogen målbar strøm i systemet. For at opnå en målbar strøm og dermed en indikator for korrosionshastigheden, må det elektriske potentiale tvinges bort fra ligevægtspotentialet E_{kor} . Dette gøres som nævnt ved hjælp af potentiostaten, der hæver potentialet op til niveauet E_1 , som vist i figur 7.7a. Hermed ændres hastigheden af både den anodiske og den katodiske proces, og der opnås en forskel i de to reaktionshastigheder, svarende til den udefra påtrykte strømstyrke i_{app} . For et ikke-initieret jern vil den påtrykte strøm, jvf. figur 7.7a, være minimal, medens den for et korroderende jern ændres med flere størrelsesordener, jvf. figur 7.7b. Ved løbende at registrere den strømstyrke, der er nødvendig for at fastholde potentialet på niveauet E_1 , bestemmes initieringstidspunktet ved en pludselig ændring af strømstyrken. Ved målemetoden påføres armeringen således et konstant positivt elektrisk potentiale i forhold til en referenceelektrode. Derefter måles strømmen gennem armering (arbejds elektroden) og hjælpeelektroden med jævne mellemrum, indtil den pludselig ændrer sig. Den forløbne tid registreres og forsøget afbrydes.

7.5.2 Apparatur

Den benyttede apparaturopstilling er skitseret i figur 7.8. Prøvelegemerne er neddykkede i en 10% NaCl-opløsning for at sikre en ensartet koncentration af kloridioner langs hele prøvens overflade. Som reference-elektrode anvendes en calomelelektrode.

Ved hjælp af potentiostaten hæves potentialet af armeringsjernet + 200 millivolt i forhold til referenceelektroden. Dette overpotential på armeringsjernet opnås ved, at potentiostaten sender en strøm gennem armeringen og den ydre hjælpeelektrode. Denne strøm registreres løbende, og for et ikke-korroderende jern vil strømmen typisk være af størrelsesordenen 0.1 μ amp. Ved initiering af korrosion vil der derimod kunne måles en strøm på flere hundrede μ amp.

Da målinger af strømstyrker helt ned til så lave værdier som 0.1 μ amp er vanskelige at foretage, er der indskudt en 1000 ohms modstand i serie med hvert armeringsjern. I stedet for at måle strømstyrken bestemmer man således spændingsfaldet over den indskudte modstand, hvilket måleteknisk er mere nøjagtigt og meget lettere.

Initieringstiden for armeringskorrosion er lig med den tid, der går fra prøvelegemet nedsænkes i saltopløsningen, til der registreres en pludselig og kraftig forøgelse af spændingsfaldet over den indskudte modstand. Dette indikerer, at kloridfronten har nået armeringsjernet og har startet korrosionsprocessen.

Efter konstateret initiering af korrosionen afbrydes den elektriske forbindelse til det pågældende armeringsjern. Dette er nødvendigt af flere grunde. For det første giver det plads til nye prøver i opstillingen. For det andet ville initierede jern meget hurtigt forøge saltopløsningens pH-værdi, hvis de ikke blev fjernet fra opstillingen, på grund af udviklingen af OH^- ved hjælpeelektroden, hvilket ikke er ønskeligt. Saltopløsningen, som prøvelegemerne er anbragt i, kontrolleres og udskiftes i øvrigt jævnlige gennem hele projektperioden.

7.5.3 Dataopsamling og bearbejdning

Da der skal måles på 882 jern, og målingerne i begyndelsen foretages med intervaller på nogle få minutter, er der benyttet et automatisk scanningsudstyr fra Hewlett Packard, jvf. figur 7.9.

Scanningsudstyret, et såkaldt "P.C.-Instrument", består af et "Digitalt Multimeter", to "Relay Multiplexers" hver med 8 kanaler, samt en 8 kanals "Relay Actuator".

De 16 kanaler styres med et scanningsprogram fra en almindelig IBM Personal Computer. Systemet er imidlertid udbygget, således at man i princip kan scanne op til 448 kanaler. Udbygningen består i praksis kun af eksterne relæer, som styres automatisk gennem Relay Actuatorens ved hjælp af en mindre ændring i det oprindelige scanningsprogram fra Hewlett Packard.

Scanningshastigheden vælges, således at initieringstiden for korrosion måles med mindst 1% nøjagtighed.

De opsamlede målinger af spændingsfaldet over modstandene udskrives jævnlige på printeren ved hjælp af et Pascal program, der formaterer de opsamlede data. Både det modificerede scanningsprogram og Pascal programmet til udskrivning af resultaterne er medtaget i bilagsrapporten, Programdokumentation.

7.6 EKSPERIMENTIELLE RESULTATER

7.6.1 Initieringstider for armeringskorrosion

Initieringstiden for armeringskorrosion i de enkelte jern i hver af de ialt 98 forskellige prøvelegemer er vist i tabel 7.5.

Det bemærkes, at registrering af korrosions-initieringstider for alle fire serier, af redaktionelle og andre praktiske grunde, er afsluttet den 1. maj 1988. På dette tidspunkt var der endnu ikke konstateret initiering af korrosion for 166 af de 882 indstøbte armeringsjern. For de armeringsjern, i hvilke korrosionen endnu ikke var konstateret den 1. maj 1988 er korrosionsinitieringstiden anført i tabel 7.5, som tiden, i døgn, fra den enkelte prøve blev nedsænket i NaCl opløsningen til den 1. maj 1988. I disse tilfælde er tallet for denne såkaldte minimumsinitieringstid understreget i tabel 7.5.

De beregnede middelindtrængningstider og spredninger for de fire serier, der indgik i undersøgelsen, er angivet i tabellerne 7.6 a-d og optegnede i form af citydiagrammer i figurerne 7.11 a-l. I samtlige tilfælde hvor et, to eller samtlige tre jern i en prøve var begyndt at korrodere før den 1. maj 1988, er beregningerne udført på grundlag af tallene i tabel 7.5. I mangel på en bedre metode har man således ladet de understregte tal i tabel 7.5 indgå i disse beregninger, velvidende at disse tal er fiktive minimumsindtrængningstider. Manglende angivelse af spredning i tabellerne 7.6 a-d er ensbetydende med, at ingen af de tre jern i den foreliggende betonprøve endnu var begyndt at korrodere den 1. maj 1988.

Målingerne er fortsat efter den 1. maj 1988, og det var oprindeligt hensigten at revidere afsnit 7.6 på grundlag af de endelige initieringstider af samtlige armeringsjern. Det må imidlertid konstateres, at mange af de resterende jern endnu ikke var begyndt at korrodere den 1. juli 1990, da det endelige redaktionelle arbejde i forbindelse med dette licentiatarbejde blev afsluttet. Derfor ville en revision af afsnit 7.6 på dette tidspunkt kun have givet anledning til mindre ændringer i de statistiske beregninger og de deraf følgende konklusioner. En sådan revision er derfor udeladt. Målingerne fortsættes imidlertid efter 1. juli 1990, og det er hensigten at offentliggøre de endelige resultater og konklusioner af korrosionsundersøgelsen i form af en artikel i et internationalt videnskabeligt tidsskrift, når initieringstiden er fundet for samtlige de jern, der indgår i undersøgelsen.

Ovennævnte problemer er desværre typiske i sådanne tilfælde, hvor der indgår reelle (altså ikke accellererede) langtidsholdbarhedsforsøg på beton i licentiatprojekter, der ifølge sagens natur skal afsluttes inden for en begrænset tid. Vi havde håbet, at der var taget højde for dette problem ved at reducere betondæklaget over armeringsjernene til så lidt som 15 mm med en tilsvarende

reduktion af initieringstiden for korrosion til følge. Desværre kronedes vore forhåbninger ikke med held, og det meget lille dæklag gav anledning til andre vanskeligheder og usikkerheder, som er beskrevet i afsnit 7.7.2.1.

7.7 DISKUSSION

7.7.1 Materialer, samt de friske betoners egenskaber og de hærtnede betoners styrker.

De til kloridforsøgene benyttede råmaterialer samt de friske og hærtnede betoners bearbejdelse og styrker er diskuteret i afsnit 6.9.

7.7.2 Initieringstider for armeringskorrosion

7.7.2.1 Spredningen på målte initieringstider

Det ses af tabellerne 7.6a-d, at der i mange af betonblandingerne er konstateret meget store spredninger på initieringstiden for de 3 indstøbte armeringsjern, selv om disse jern befinder sig i samme prøvelegeme med kun 25 mm's afstand og med samme dæklagstykkelse på 15 mm.

Der er foretaget en række separate undersøgelser for at fastlægge årsagen til de store variationer i kloridindtrængningstid i samme beton.

- A) Det er undersøgt, om den store spredning på forsøgsresultaterne skyldes "udstøbningsfejl" i betondæklaget.

I en separat undersøgelse blev der udstøbt nye prøvelegemer med armeringsjern. For halvdelen af de nye prøvers vedkommende blev ca. 1 mm af betonernes overfladehud fjernet, før prøverne blev udsat for klorid, og initieringstiden blev bestemt. Forsøget viste, at variationskoefficienten for initieringstiden for tre jern i samme betonprøve typisk er ca. 35%, når betonprøvens overfladehud fjernes. Da der også kunne konstateres en gennemsnitlig variationskoefficient på ca. 35% for korrosionsinitieringstiden i prøvelegemer, hvor betonhuden ikke blev fjernet, kan det konkluderes at store variationskoefficienter næppe skyldes overfladeuregelmæssigheder.

- B) Det er undersøgt, om de målte kloridinitieringstider er ensbetydende med, at korrosion af armeringsjernene virkelig er begyndt.

Alle prøver, der var vandlagrede i 14 døgn, og som var fremstillet med Lavalkali cement og Asnæs flyveaske, blev flækket langs hvert armeringsjern og besigtiget visuelt, umiddelbart efter at der var registreret korrosion.

Det blev herved konstateret, at korrosion virkelig var begyndt på de besigtede armeringsjern, og at de udstøbte epoxyhuller ud for armeringsenderne var tætte. Kun på 4 af ialt 81 undersøgte armeringsjern, var det ikke muligt at observere noget korrosionsangreb med det blotte øje.

Figur 7.12 viser en flækket betonprøve og et typisk eksempel på grubetæring.

Det kan altså konkluderes, at de registrerede initieringstider stemmer vel overens med tiden for begyndende korrosion, og at korrosionen ikke skyldes utilsigtet klorid-indtrængning og rustangreb omkring udstøbte epoxyhuller.

- C) For adskillige betonprøvers vedkommende, jvf. tabel 7.5, opnås forholdsvis hurtig initiering af korrosion i de første to armeringsjern, mens der i flere tilfælde endnu ikke var målt nogen korrosion på det tredje jern per 1 maj 1988, og for manges vedkommende heller ikke per 1. juli 1990.

Det er undersøgt, om de lange initieringstider for det sidste jern i betonprøverne kunne skyldes særlige forhold i forbindelse med målemetoden. I 9 af disse prøver er der boret et 10 mm hul til en dybde af 12.5 mm, hvilket svarer til at dæklagets tykkelse over det endnu ikke initierede jern reduceres til 2.5 mm. I halvdelen af de undersøgte prøver blev der siden registreret initiering i løbet af 3-100 timer. I den anden halvdel af de undersøgte prøver, var der endnu ikke registreret nogen initiering efter 300 døgn.

Det kan således ikke udelukkes, at en del af den store spredning på initieringstiderne kan skyldes et ukendt fænomen i forbindelse med målemetoden selvom dette ikke er sandsynliggjort i den foreliggende undersøgelse. Ej heller kan det udelukkes, at de store spredninger faktisk er et udtryk for betons inhomogenitet i forbindelse med så lille en dæklagstykkelse på 15 mm i forbindelse med en forholdsvis stor nominel max. stenstørrelse på 8 mm.

De supplerende undersøgelser har vist, at der med den benyttede elektrokemiske målemetode, kan forventes variationskoefficienter på op til 35% i initieringstiden for identisk indstøbte jern i samme prøvelegeme. Små udstøbningsfejl og inhomogeniteter i betonen kan i uheldige tilfælde medføre variationer i korrosionsinitieringstiden på over 100%.

På grundlag af disse betragtninger må det konkluderes, at ingen af de målte initieringstider kan forkastes som fejlagtige. Hvis undersøgelserne skulle gentages, ville man nok øge prøvelegemernes størrelse og dermed dæklagets tykkelse, medens man ville bibeholde den maksimale stenstørrelse. Det må forventes, at spredningen på initieringstider for korrosion af armeringsjern i beton vil aftage med øgende dæklagstykkelse og med aftagende maksimal stenstørrelse, men dette mangler endnu at blive påvist.

7.7.2.2 Middel-initieringstider for korrosion.

Der er per 1 maj 1988 målt middel-initieringstider for korrosion af armeringsjern i beton af størrelsesordenen fra 0.1 døgn for de magreste blandinger, op til mere end 650 døgn for de tætteste blandingers vedkommende. På trods af store spredninger på initieringstiderne for de enkelte prøver viser de udregnede middelindtrængningstider alligevel klare tendenser for de forskellige serier.

Sammenligning mellem betonernes trykstyrker i tabellerne 6.6a-d og de opnåede initieringstider for armeringskorrosion i tabellerne 7.6.a-d viser, at der ikke er nogen generel sammenhæng mellem betons trykstyrke og dens tæthed overfor kloridioner. Til alle terminer er styrken af beton, som fremstilles med Aalborg Lavalkali cement og Slite cement stort set ens, hvorimod initieringstiden for beton fremstillet med Aalborg Lavalkali cement generelt er væsentlig mindre end initieringstiden for beton som fremstilles med Slite cement. Kun for almindelig beton uden flyveaske kan man måske hævde, at højere trykstyrker svarer til længere initieringstider.

De armerede betonprøver blev vandlagrede i henholdsvis 14, 28 og 56 døgn, før de blev udsat for kloridpåvirkning. Som det ses af citydiagrammerne over indtrængningstider i figurerne 7.11a-l, medfører længere vandlagringstid før betonerne udsættes for klorid, generelt længere initieringstid. Dette gælder både for flyveaskebeton og for almindelig beton, som fremstilles uden flyveaske.

Det kan altså konstateres, at en længere vandlagringstid, før betonerne udsættes for klorid, har signifikant forbedrende virkning på betonernes tæthed over for kloridioner.

Det fremgår ligeledes af de angivne initieringstider i tabellerne 7.6a-d og figurerne 7.11a-l, at både cementtype og flyveasketype er signifikante og vigtige parametre for betons modstanddygtighed over for kloridindtrængning.

Beton, som fremstilles med Lavalkali cement, opnår i almindelighed meget korte initieringstider, uanset om der benyttes flyveaske eller ej, jvfr. tabellerne 7.6a-b og figurerne 7.11a-f. For sådan beton har tilsætning af flyveaske tilsyneladende slet ingen virkning ved c/v forhold under 1.8 svarende til v/c forhold på 0.55. For større c/v forhold, d.v.s. lavere v/c forhold, og især ved længere tids vandlagring før kloridpåvirkning, ser det dog ud til, at flyveaske kan forøge betonens tæthed over for kloridindtrængning, selv når betonen fremstilles med Lavalkali cement.

For beton, som fremstilles med Slite Portland cement, ses det af tabellerne 7.6c-d og figurerne 7.11g-l, at anvendelse af flyveaske forbedrer betons tæthed ved alle de undersøgte startvandlagringstider og for alle c/v forhold. Det fremgår af resultaterne, at jo mere flyveaske, der tilsættes, før prøverne udsættes for klorid, desto tættere bliver betonerne over for kloridindtrængning. Det ses også, at jo længere flyveaskebetonerne vandlagres, før de udsættes for klorid, desto længere tid går der, før de indstøbte armeringsjern begynder at korrodere. Beton, som fremstilles med Slite Portland cement, men uden tilsætning af flyveaske, opnår derimod kun begrænset tæthed over for indtrængning af kloridioner, selv ved c/v forhold på 2.6 (v/c forhold på 0.38) og vandlagringstider på 56 døgn før kloridpåvirkning.

Det ses ved sammenligning af værdierne i tabellerne 7.6a-d, og ved sammenligning af de optegnede citydiagrammer i figurerne 7.11a-l, at flyveaskebeton, som fremstilles med Slite Portland cement, opnår væsentlig længere initieringstid, end tilsvarende beton som fremstilles med Lavalkali cement. Det fremgår ligeledes af disse tabeller og figurer, at tilsætning af Thy flyveaske gør alle betoner tættere, end hvis der tilsættes Asnæs flyveaske. Det må dog konstateres, at virkningen af flyveasketypen er væsentlig mindre end virkningen af cementtypen.

Det kan konkluderes, at cementtypen er en af de vigtigste materiale parametre for klorid-initieringstidens længde, medens flyveasketype og vandlagringstid for beton på 14, 28 eller 56 døgn, før beton udsættes for klorid, kommer i anden række.

Ovennævnte forskel mellem kloridindtrængningstiden for beton, som fremstilles med almindelig Portland cement, svarende til ASTM type I, og sulfatbestandig cement, svarende til ASTM type V, er også konstateret af Short og Page [69] for cementpastas vedkommende. Desuden har Bakker [99] fundet, at beton, som fremstilles med højvovsslagge cement, kan være op til 100 gange tættere end beton, som fremstilles med almindelig Portland cement. Cementtypernes betydning for den hastighed, hvormed kloridioner diffunderer i beton, er således uomtvistelig.

7.7.3 Kloridtæt beton

På grundlag af de optegnede citydiagrammer over initieringstider i figurerne 7.11 a-l ser det ikke ud til, at der er nogen simpel sammenhæng mellem på den ene side initieringstiden for armeringskorrosion og på den anden side c/v - og f/v -forholdet for betoner, som fremstilles med forskellige cementer og flyveasker. Forekomst af betonblandinger, der endnu ikke havde givet anledning til korrosion per 1 maj 1988, dvs. efter mere end 600 døgn, giver dog håb om, at det er muligt at fremstille betoner, som er tilstrækkeligt tætte mod kloridindtrængning til praktisk brug. I det følgende betegnes betoner, der har initieringstider over 600 døgn, som værende "meget tætte".

På grundlag af en simpel kurvetilpasning af de per 1 maj 1988 opnåede resultater ser det ud til, at grænsen for sammensætning af sådanne meget tætte betoner kan udtrykkes ved følgende generelle ulighed:

$$\frac{v}{c} + A_3 \frac{f}{v} < B_3 \quad (7.10)$$

hvor A_3 og B_3 = konstanter, som afhænger af de benyttede cement- og flyveasketyper samt af betonens vandlagringstid, før den udsættes for påvirkning af klorider.

c = betonens cementindhold, (kg/m^3)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m^3)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m^3)

For beton, som fremstilles med Lavalkali cement, er der kun opnået meget tæt beton med Thy flyveaske, og kun efter 56 døgn vandlagring før kloridpåvirkning. Ligning 7.10 for meget tæt beton får følgende udseende for beton, som er fremstillet med Lavalkali cement og Thy flyveaske, og som er vandlagret i 56 døgn før kloridpåvirkning (jvfr. fig. 7.11f):

$$\frac{v}{c} - 0.2 \frac{f}{v} < 0.35 \quad (7.11)$$

Flyveaskebeton, som fremstilles med Lavalkali cement og Asnæs flyveaske, opnår ikke tilsvarende tæthed, selv efter 56 døgn vandlagring før betonen udsættes for kloridpåvirkning.

For flyveaskebeton, som fremstilles med Slite cement kan konstanten B_3 i ligning 7.10 sættes lig med 0. Dette leder til ligning 7.12 for meget tæt Slite flyveaskebeton, svarende til en ligesidet hyperbelgren:

$$\frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} > A_4 = (-A_3)^{-1} \quad (7.12)$$

hvor konstanten A_4 er afhængig af flyveasketype og vandlagringstid.

Foreløbige værdier for konstanten A_4 i ligning 7.12, som fremstilles med Slite cement og Asnæs, respektive Thy flyveaske, fremgår af tabel 7.7.

De i henhold til ligning 7.12 fundne grænser for meget tætte betoner er indlagt som ligesidede hyperbelgrene i city-diagrammerne over initieringstider, se figurerne 7.11 g-l.

7.7.4 Diffusionskoefficienter for klorid

På grundlag af de i undersøgelsen målte initieringstider for begyndende armeringskorrosion er diffusionskoefficienterne (D_k) for kloridion udregnet og angivet i tabellerne 7.8a-d i mm²/år. I tabellerne 7.9a-d er D_k desuden angivet i cm²/sek. Diffusionskoefficienterne er udregnet på grundlag af den tilnærmede løsning til Fick's anden diffusionslov, der er vist i ligning 7.6. Her er den maksimale indtrængningsdybde sat lig med dæklagets tykkelse over armeringsjernene, som er 15 mm for alle prøvelegemer.

For de prøvelegemer, hvor korrosionen endnu ikke var påbegyndt i alle tre armeringsjern den 1 maj 1988, er der ved beregningen benyttet de fundne minimums-initieringstider, d.v.s. tiden fra kloridpåvirkningens begyndelse til den 1. maj, 1988.

7.7.4.1 Diffusion af klorid i beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske

På grundlag af de eksperimentelt bestemte diffusionskoefficienter (D_k) for klorid, der er vist i tabellerne 7.8a-d, er det undersøgt, om der kan opstilles en simpel matematisk model for sammenhængen mellem D_k og betonblandingernes c/v - og f/v - forhold.

Opbygning og test af modellerne er foretaget med SAS procedurerne REG, RSQUARE og STEPWISE, m.fl., som f.eks. beskrevet af John Sall i SAS Technical Report A-102 [94]. I bilagsrapportens kapitel B.3 og B.4 er medtaget et lille udsnit af modelopbygningen og testen af modellerne.

Det er herved fundet at D_k for beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske, kan bestemmes ved hjælp af en af de følgende to ligninger:

$$D_k = A_5 \left[\frac{v}{c} \right]^4 \quad (7.13)$$

eller

$$D_k = \exp^{[A_2 \cdot \frac{c}{v} + E_2]} \quad (7.14)$$

hvor D_k = diffusionskoefficient for kloridioner i beton, (mm²/år)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

A_5, A_2, E_2 = konstanter, hvis værdi afhænger af de benyttede delmaterialer, af lagringstiden i vand før betonen udsættes for kloridpåvirkning, og af de benyttede enheder for D_k .

Værdien af konstanterne A_5, A_2, E_2 samt de opnåede korrelationskoefficienter for de to matematiske modeller til beregning af D_k for beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske, er vist i tabellerne 7.10 og 7.11.

Det fremgår af disse tabeller, at ligning 7.13, der bygger på en potensfunktion, er en bedre model til beregning af D_k for beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske, end ligning 7.14, der bygger på en eksponential funktion.

Det ses desuden af de estimerede værdier for konstanten A_5 i tabel 7.10 for beton, som er fremstillet med Lavalkali cement, at D_k reduceres med ca. 25% ved vandlagring af betonerne i 28 eller 56 døgn i forhold til 14 døgn vandlagring før kloridpåvirkning. Derimod opnår beton, som er fremstillet med Slite cement, omtrent samme lave D_k værdi, uanset om betonerne vandlagres i 14, 28 eller 56 døgn, før de udsættes for klorid.

Det kan således konstateres, at vandlagringstiden før betonerne udsættes for klorid er væsentlig for beton, som er fremstillet med Lavalkali cement, medens vandlagring ud over 14 døgn ikke har nogen større indflydelse på D_k for beton, som fremstilles med Slite cement.

Tabel 7.10 viser i øvrigt, at D_k værdierne for beton, som fremstilles med Slite cement, er mindre end det halve af D_k værdierne for beton, der fremstilles med Lavalkali cement, når betonerne vandlagres lige længe, før de udsættes for påvirkning af klorid. Denne forskel mellem almindelig Portland cement, svarende til ASTM type I, og Lavalkali cement, svarende til ASTM type V, er også konstateret ved kloriddiffusionsforsøg på cementpasta af Short og Page [69].

Det bør dog bemærkes, at opbygningen af de matematiske modeller for beton, som er fremstillet uden tilsætning af flyveaske og de dertil svarende beregninger af værdierne for konstanterne i modellerne, kun er baseret på resultater fra 2 x 5 forskellige betonblandinger. Det bemærkes desuden at begge modeller er rent fænomenologiske. De giver ingen fysisk forklaring på diffusionskoefficientens afhængighed af betonsammensætningen.

Det kan således konkluderes, at ligning 7.13 angiver den bedst fundne matematiske model til beskrivelse af de opnåede diffusionskoefficienter for beton, som fremstilles uden flyveaske:

$$D_k = A_5 \cdot \left[\frac{v}{c} \right]^4 \quad (7.13)$$

Det er bemærkelsesværdigt, at diffusionskoefficienten for klorid i beton øger med en fjerde potens af v/c forholdet, medens betons styrke kun, ifølge Bolomey's formel ændrer sig med det reciprokke v/c forhold i første potens.

Der er altså en betydelig stærkere afhængighed mellem betons diffusionskoefficient for klorider og betons vand-cement forhold, end mellem betons styrke og vand-cement forhold. Dette er noget, som den praktiserende ingeniør bør have in mente.

Potensfunktionen i ligning 7.13 for almindelig beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske, kan ikke umiddelbart udvides til at beskrive diffusionskoefficienten for kloridioner i flyveaskebeton. Som vi senere skal få at se, er det derimod muligt at beskrive diffusionskoefficienten både for almindelig beton og for flyveaskebeton ved hjælp af en eksponentialfunktion, der for beton, som fremstilles uden flyveaske, er vist i ligning 7.14. Derved mister beskrivelsen af almindelig betons diffusionskoefficient, som fremstilles uden flyveaske, ganske vist lidt i nøjagtighed, men ikke mere end at det er til at leve med.

Eksponentialfunktionen er den model, vi har fundet, som kan beskrive diffusion af kloridioner både i almindelig beton og i flyveaskebeton.

7.7.4.2 Diffusion af klorid i flyveaskebeton

For de fire serier af beton, som er fremstillet med kombinationer af Slite/Lavalkali cement og Asnæs/Thy flyveaske, er det undersøgt, om diffusionskoefficienten (D_k) kan beregnes efter den af Hansen, Jensen og Johannesson [67] foreslåede matematiske model dvs., ved ligning 7.7:

$$D_k = \exp^{A_2 \cdot \left[\frac{c + k_d \cdot f}{v} \right] + E_2} \quad (7.7)$$

hvor D_k = diffusionskoefficient for kloridioner, ($\text{mm}^2/\text{år}$)

c = betonens cementindhold, (kg/m^3)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m^3)

ν = betonens vandindhold, (kg/m^3)

A_2 og E_2 = konstanter, hvis værdi er afhængige af betonsammensætning og lagringstid.

k_d = aktivitetsfaktor for flyveaske med hensyn til kloridiondiffusion

Det fremgår af ligning 7.7, at denne model er en udvidelse af det tidligere fundne eksponentialfunktionsudtryk for D_k for beton, som fremstilles uden flyveaske, der er beskrevet i ligning 7.14. I modellen for flyveaskebeton tages hensyn til flyveaskens bidrag til betonens tæthed over for kloridioner ved at medtage det aktuelle f/ν forhold multipliceret med en aktivitetsfaktor k_d . Undersøgelsen af diffusionsmodellen for flyveaskebeton er foretaget ved hjælp af regressionsanalyse. Ved denne undersøgelse er brugt det statistiske analyse program SAS [93]. De væsentligste resultater af analysen er vist i tabel 7.12 og tabel 7.13, medens selve analysen er placeret i bilagsrapportens kapitel B.4 og B.5

Tabel 7.12 viser resultatet af en regressionsanalyse, hvor konstanterne A_2 og E_2 er fastholdt på de værdier, der tidligere blev opnået for betoner uden flyveaske, og som er vist i tabel 7.11. Til sammenligning med denne restriktive analyse viser tabel 7.13 resultatet af en tilsvarende analyse, hvor værdierne af konstanterne i ligning (7.7) ikke er fastlagt på forhånd. I denne analyse benævnes konstanterne A_6 og E_6 , og de tillægges således værdier, som udelukkende har til hensigt at sikre den bedst mulige model set fra et statistisk synspunkt, men som ikke nødvendigvis er de bedst mulige i en model for beton, der fremstilles uden tilsætning af flyveaske.

De understregede værdier i de to skemaer viser de tilfælde, hvor analysen viser, at konstanterne ikke bidrager signifikant til at forbedre modellen. De kan derfor eventuelt udelades af modellen.

Det ses af tabel 7.12, at den af Hansen, Jensen og Johannesson [67] foreslåede diffusionsmodel ikke er særlig velegnet til at beregne de i denne rapport undersøgte flyveaskebetoners tæthed over for indtrængning af kloridioner. Samme model uden restriktioner på de indgående konstanter, jvfr. tabel 7.13, giver lidt bedre bestemmelse af D_k for flyveaskebetonerne, men hvis disse værdier for konstanterne benyttes i ligning 7.7, mister modellen i nøjagtighed ved beregning af D_k -værdier for almindelig beton uden flyveaske.

Modellen i ligning 7.7 tager både hensyn til cementens og til flyveaskens bidrag til betonernes tæthed over for klorid, men der er ikke noget led i modellen, der kan tage højde for en eventuel samvirken mellem den benyttede cement og den benyttede flyveaske.

En nærmere undersøgelse af figurerne 7.11a-l viser, at netop de blandinger, der indeholder lige store mængder af cement og flyveaske (udtrykt ved c/ν - og f/ν -forhold) tilsyneladende opnår meget stor tæthed over for klorid. Dette kunne tyde på, at en generel model til beregning af flyveaskebetoners D_k værdi bør indeholde et led, som tager hensyn til eventuel samvirken mellem cement og flyveaske.

De fundne værdier for diffusionskoefficienten for de fire serier af beton er derfor testet efter en udvidet matematisk diffusionsmodel, der fremgår af ligning 7.15. Denne model tager både hensyn til c/v - og til f/v -forholdets virkning på D_k -værdierne. Samtidig indeholder den et dobbeltled af typen $(c/v \cdot f/v)$, som tager hensyn til samvirkningen mellem cement og flyveaske. Det bemærkes, at den numeriske værdi af dette led netop har sin maksimale værdi, når c og f er procentueltvis lige store.

$$D_k = \exp^{[A_2 \frac{c}{v} + B_2 \frac{f}{v} + D_2 \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E_2]} \quad (7.15)$$

hvor D_k = diffusionskoefficient for kloridioner i beton, ($\text{mm}^2/\text{år}$)

c = betonens cementindhold, (kg/m^3)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m^3)

v = betonens vandindhold, (kg/m^3)

A_2, B_2, D_2 og E_2 = konstanter, hvis værdi er afhængige af cementtype, flyveasketype og betonens lagringstid i vand før kloridpåvirkning

I tabel 7.14 er givet en oversigt over de væsentligste resultater af en regressionsanalyse af den udvidede diffusionsmodel, der er beskrevet i ligning 7.15. I analysen fastholdes konstanterne A_2 og E_2 på de værdier, der blev fundet for beton uden tilsætning af flyveaske, således at det sikres, at den testede model også kan benyttes til bestemmelse af D_k for beton uden flyveaske. De understregede værdier i skemaet er ikke fundet signifikante ved analysen, hvilket betyder, at de ikke bidrager væsentligt til de beregnede D_k -værdier. Analysen er vist i sin helhed vist i bilagsrapporten kapitel B.6.

Det ses af de opnåede korrelationskoefficienter i tabel 7.14, at den udvidede ligning 7.15 giver en bedre beskrivelse end ligning 7.7 af de opnåede diffusionskoefficienter for de betoner, der er undersøgt i det foreliggende projekt.

Denne analyse har imidlertid, ligesom de foregående, den mangel, at den ikke tager hensyn til det store antal endnu ikke initierede prøver, jvfr. bemærkningerne til skemaerne. Det ses også, f.eks. af tabel 7.14, at korrelationskoefficienten bliver væsentlig dårligere, jo flere endnu ikke initierede prøver, der indgår i analysen.

Det kan imidlertid konstateres, at eksponentialfunktionen i ligning 7.15 giver en rimelig acceptabel beskrivelse af sammenhængen mellem betons diffusionskoefficient for kloridioner og betonsammensætning.

$$D_k = \exp^{[A_2 \frac{c}{v} + B_2 \frac{f}{v} + D_2 \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E_2]} \quad (7.15)$$

hvor D_k = diffusionskoefficient for kloridioner i beton, ($\text{mm}^2/\text{år}$)

c = betonens cementindhold, (kg/m^3)

f	=	betonens flyveaskeindhold, (kg/m ³)
v	=	betonens vandindhold, (kg/m ³)
A_2, B_2, D_2 og E_2	=	konstanter, hvis værdi er afhængige af cementtype, flyveasketype og betonens lagringstid i vand før kloridpåvirkning

7.8 KONKLUSION VEDRØRENDE KLORIDINDTRÆNGNING I BETON

7.8.1 Initieringstid for korrosion i flyveaskebeton

Undersøgelsen af initieringstid for armeringskorrosion, der er beskrevet i dette projekt, har vist, at viden om flyveaskebetons trykstyrke ikke kan bruges til at forudsige noget generelt om betons modstandsdygtighed mod armeringskorrosion. Denne konklusion gælder selv for identisk udstøbte laboratorieprøver med samme dæklagstykkelse over armeringen og samme kloridpåvirkning. Kun for betoner, som fremstilles med samme cementtype og uden flyveaske, kan betonens trykstyrke benyttes som en indikator for betonens initieringstid for armeringskorrosion.

Ved proportionering af beton med hensyn til tæthed overfor kloridiondiffusion er det vigtigt at notere sig, at der kan forventes variationskoefficienter på initieringstiden på 35%, selv for helt fejlfrie prøvelegemer. I forbindelse med udstøbningsfejl og inhomogeniteter i betonen, som må forventes at forekomme i praksis, kan variationskoefficienten mangedobles. Spredningen på initieringstiden må forventes at aftage med øgende dæklagstykkelse og aftagende største benyttede stenstørrelse ved fremstilling af betonen. Dette er imidlertid ikke undersøgt i det foreliggende projekt.

Det konkluderes, at de vigtigste faktorer for fremstilling af kloridtæt beton er valget af delmaterialer. Blandt delmaterialerne er cementtypen den altafgørende faktor, mens flyveasketype og vandlagringstid over en vis minimumsperiode er af mindre betydning.

Det bedste udtryk for diffusionskoefficienten for kloridindtrængning i flyveaskebeton, som vi har kunnet finde, fremgår af ligning 7.15.

$$D_k = \exp^{[A_2 \frac{c}{v} + B_2 \frac{f}{v} + D_2 \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E_2]} \quad (7.15)$$

hvor	D_k	=	diffusionskoefficient for kloridioner i beton (mm ² /år)
	c	=	betonens cementindhold, (kg/m ³)
	f	=	betonens flyveaskeindhold, (kg/m ³)
	v	=	betonens frie vandindhold, (kg/m ³)
	A_2, B_2, D_2 og E_2	=	konstanter, hvis værdi er afhængige af cementtype, flyveasketype og betonens lagringstid i vand før kloridpåvirkning

Undersøgelsesresultaterne antyder, at der kan opstilles visse betingelser for sammensætning af beton, som i praksis vil sikre, at betonen bliver tilstrækkelig tæt over for kloridindtrængning, altså at den armerede beton får en vis forudberegnelig og tilstrækkelig lang levetid. På grundlag af de foreløbigt opnåede resultater ser det ud til, at grænseværdierne for v/c - og f/v -forholdene for meget tætte betoner, svarende til gennemsnitlige diffusionskoefficienter for betonerne på under ca. $8,5 \text{ mm}^2/\text{år}$, kan formuleres som vist i ligning 7.10.

$$\frac{v}{c} + A_3 \frac{f}{v} < B_3 \quad (7.10)$$

c = betonens cementindhold, (kg/m^3)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m^3)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m^3)

hvor A_3 og B_3 = konstanter, som afhænger af de benyttede cement- og flyveasketyper samt af betonens vandlagringstid, før den udsættes for påvirkning af klorider

For beton, som fremstilles med almindelig Slite Portland cement og Asnæs flyveaske, og som vandlagres i 14 døgn, kan A_3 sættes lig med -0.5, mens B_3 kan antages at være lig med 0.

For beton, som fremstilles med Aalborg lavalkali cement, kan der kun opnås meget kloridtæt beton i praksis, hvis der bruges Thy flyveaske, og hvis den nyudstøbte beton samtidig vandlagres i 56 døgn, før den udsættes for kloridpåvirkning.

7.8.2 Den danske betonnorms begrænsninger for tilsætning af flyveaske til beton af hensyn til armeringskorrosion

For armeret betons vedkommende stiller den danske betonnorm de i tabel 4.1 anførte krav til v/c -forhold og karakteristisk trykstyrke f_{ck} , for at der skal kunne opnås tilstrækkelig tæthed til sikring mod armeringskorrosion. Normen kræver ligeledes af hensyn til beskyttelse af armering mod korrosion, at den maksimale vægtmængde flyveaske, der må bruges i armeret beton, skal være mindre end 35 vægtprocent af det samlede indhold af cement og flyveaske.

Normens krav til maksimal tilladelig anvendelse af flyveaske er vist i figur 8.3, hvor de skraverede områder angiver tilladelige sammensætninger af beton til armerede konstruktioner. En sammenligning af normens grænser for anvendelse af flyveaske og de i denne undersøgelse fundne initieringstider for armeringskorrosion viser, at begrænsningen på max. 35 vægtprocent flyveaske ikke er begrundet, hvorimod v/c -tals grænserne ikke helt kan afvises på baggrund af de opnåede resultater.

Det kan altså konkluderes, at den danske betonnorms begrænsninger for anvendelse af flyveaske i beton ikke kan underbygges på grundlag af resultaterne af den foreliggende undersøgelse. Tværtimod viser undersøgelsen, at konstruktionsbeton bliver tættere overfor kloriddiffusion, jo mere flyveaske, der tilsættes, også udover de nævnte 35 vægtprocent.

8 VANDINDTRÆNGNING I FLYVEASKEBETON

8.1 GENERELT OM BETONS PERMEABILITET

8.1.1 Betons tæthed over for væske eller gas

Nedbrydning af beton ved tidlig alder er desværre et almindeligt forekommende fænomen. Ødelæggelse kan både skyldes indre og ydre omstændigheder. Fugt, frost, temperatur, last-svingninger, slitage og angreb af kemisk aggressive stoffer er eksempler på ugunstige ydre miljøpåvirkninger. Indre påvirkninger af ugunstig art omfatter hovedsagelig forkert valg af delmaterialer til fremstilling af betonen eller forkert proportionering af betonen i forbindelse med dårlig blanding, komprimering og efterbehandling af betonen som følge af utilstrækkeligt tilsyn eller mangel på kompetent arbejdskraft på byggepladsen.

De fleste skader på beton begynder på grund af utætheder i betonen. Så godt som alle holdbarhedsmæssige problemer i beton kan føres tilbage til det faktum, at en væske i en eller anden form, evt. i forbindelse med opløste skadelige stoffer, trænger ind i betonen fra omgivelserne og ødelægger den. Transport af fremmede stoffer ind i, eller gennem beton kan teoretisk deles op i væske- eller gastransport. Som regel foregår transport ved en kombination af to transportmekanismer, og de drivende kræfter er tryk-, koncentrations- eller temperaturgradienter eller kombinationer af disse.

Betonens evne til at tillade transport af væske eller gas som følge af forskelle i hydraulisk tryk eller damptryk i og uden for betonen kaldes permeabilitet, hvorimod transport af stof på grund af koncentrationsforskelle mellem betonens ydre og indre foregår ved såkaldt diffusion. I de fleste tilfælde har de to fænomener intet til fælles, og den tilsyneladende lighed mellem Darcy's lov for permeabilitet og Fick's lov for diffusion må ikke forlede nogen til at forveksle fysisk-kemiske fænomener, der giver anledning til de to transportmekanismer.

For at fremstille holdbar beton med tilfredsstillende levetid må det sikres, at betonen er tilstrækkelig tæt. Betons permeabilitets- og diffusionstæthed er nøglefaktorer for dens holdbarhed. Derfor er der foretaget mange undersøgelser af konstruktionsbetons permeabilitet og diffusionstæthed [70] - [91].

Da transport af væske eller gas gennem beton nødvendigvis må foregå gennem betonens pore-system eller langs indre overflader i materialstrukturen, er betonens permeabilitet nært forbundet med dens porøsitet og porestruktur. Forsøg på at sammenkæde betons permeabilitet med dens indre struktur er ikke af ny dato. Både undersøgelsesmetoder og fortolkninger af resultaterne forbedres imidlertid løbende [72, 73, 81, 82, 83, 84]. Ikke desto mindre konstaterede Hughes [85] så sent som 1985:

"In recent years, advances have been made in relating permeability and pore structure, but further work is necessary to satisfy the requirements for specific modelling purposes."

Permeabilitet af et porøst materiale som beton med hensyn til transport af væske eller gas er både afhængig af betonens egenskaber, af det transporterede stof, og af målemetoden.

Nok er permeabiliteten vigtig, men den mest lumske og ofte den farligste måde, på hvilken udefra kommende stoffer i praksis kan trænge ind i betonen, foregår ved diffusion. Diffusion er karakteriseret ved, at stoftransporten alene sker på grund af usynlige koncentrations- eller temperaturforskelle. Dette til forskel fra permeabilitet, hvor stoftransporten alene skyldes synlige ydre væske eller gastrykforskelle. Hvis man ser bort fra betondæmninger og beholdere, udsættes almindelige betonkonstruktioner sjældent for større ydre tryk af gas eller væske. I de fleste betonkonstruktioner vil der imidlertid eksistere forskelle i damppartialtryk, som medfører at trykket af en gas, f.eks. vanddamp, i betonen vil være større eller mindre end trykket af samme gas i betonens omgivelser.

Transport af molekyler eller ioner, f.eks. på grund koncentrationsforskelle, kaldes diffusion. De indtrængende molekyler eller ioner giver anledning til en diffusionsstrøm eller flux ind i, ud af, eller inden i betonen, som for stationære forholds vedkommende kan beskrives ved Fick's første lov. Når der er tale om større diffusionsafstande eller dybder, hvor koncentrationsgradienten ændrer sig som funktion af indtrængningsdybden, kan transporten beskrives ved Fick's anden lov. Diffusion er tidligere beskrevet for et halvuendeligt medium i afsnit 7.1.3 i forbindelse med indtrængning af kloridioner i beton, og diffusion vil ikke blive omtalt yderligere i denne del af rapporten. Det foreliggende afsnit 8 i rapporten omhandler udelukkende transport af gas eller væske i beton på grund af ydre trykforskelle, altså betons permeabilitet.

Tæthed, eller omvendt, permeabilitet af beton kan undersøges enten ved hjælp af gas eller væske. Resultater af sådanne undersøgelser angives i form af en permeabilitetskoefficient. Permeabilitetskoefficientens størrelse er et udtryk for, hvor let en gas eller en væske kan trænge ind i eller gennem betonen. Jo større værdi permeabilitetskoefficienten antager, desto lettere passerer gas eller væske gennem materialet. Såvel i litteraturen som i denne rapport benyttes ofte betegnelsen permeabilitet, når der egentlig menes permeabilitetskoefficient.

Da værdien af permeabilitetskoefficienten for beton både med hensyn til størrelse og med hensyn til enheder er afhængig af målemetoden, er det vigtigt, at der skelnes mellem følgende former for tæthed eller permeabilitet.

- 1) Tæthed eller permeabilitet af beton over for gas
- 2) Tæthed eller permeabilitet af beton over for væske.

Ad 1) Betons permeabilitet over for gas

Undersøgelse af betons eller cementpastas permeabilitet foregår simplest ved at måle, hvor meget vand, der kan presset gennem betonen eller cementpastaen i løbet af en vis tid. Måling af vandtransport gennem beton eller pasta på grund af ydre tryk er imidlertid tidskrævende. For god konstruktionsbetons vedkommende tager det nemlig meget lang tid, før der opnås stationær gennemstrømning. Desuden ændrer betonens mikrostruktur sig med tiden på grund af cementens fortsatte hydratisering. I mange tilfælde er det umuligt at måle nogen som helst gennemstrømning af vand, fordi betonen er så tæt, at den slet ikke tillader nogen målelig vandgennemstrømning. Mange undersøgelsesmetoder af permeabilitet bygger derfor på måling af gennemstrømning af gas gennem beton, cementpasta eller mørtel, fordi der langt hurtigere opnås stationær gen-

nemstrømning af gas end af vand. Problemet ved måling af gasgennemstrømning er imidlertid, at sådan måling nødvendigvis må udføres på udtørrede prøvelegemer. Derved bliver det vanskeligt at fortolke resultaterne, fordi betonens eller pastaens udtørningshistorie påvirker dens permeabilitet.

Udgangspunktet for undersøgelser af porøse materialers permeabilitet, og bestemmelse af sådanne materialers permeabilitetskoefficient, er Hagen-Poiseuille's lov, der angiver sammenhængen mellem strømningshastigheden af gas eller væske gennem en kapillarpore med en vis radius og trykforskellen mellem de to ender af poren samt porelængden og det gennemstrømmende medies dynamiske viskositet, således som det fremgår af ligning 8.1.

$$Q = \frac{r^4 \cdot \pi \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (8.1)$$

hvor Q = massestrøm, (m^3/s)

r = poreradius, (m)

Δp = trykforskel mellem de to ender af poren, (N/m^2)

L = længde af poren, (m)

η = gassens eller væskens dynamiske viskositet, ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)

Hagen-Poiseuille's lov er udførligt undersøgt af f.eks. Zagar [86], og den kan ifølge Zagar [86], Nischer [76], Graf et al. [75] og Poon et al. [79] omformes til følgende ligning, der kan bruges til bestemmelse af betons tæthed over for gennemstrømmende gas:

$$\Phi = \frac{Q \cdot \eta \cdot L \cdot 2 \cdot p}{A \cdot (p_1^2 - p_2^2)} \quad (8.2)$$

hvor Φ = specifik permeabilitetskoefficient, (m^2)

Q = massestrøm, (m^3/s)

A = prøveareal, (m^2)

L = prøvelegemets tykkelse i strømningsretningen, (m)

η = gassens viskositet, ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)

p = tryk, ved hvilket den gennemstrømmende gas måles, (N/m^2)

p_1 = indgangstryk, (N/m^2)

p_2 = udgangstryk, (N/m^2)

Ved at etablere en trykforskel mellem et prøvelegemes to sider og måle den gasmængde, der strømmer gennem prøvelegemet, kan en betons eller en cementpastas specifikke permeabilitetskoefficient direkte beregnes ved hjælp af ligning 8.2. Det bemærkes, at den specifikke permeabilitetskoefficient for et porøst materiale kun er afhængig af det gennemstrømmende medies viskositet, og at den har enheden m^2 .

Ad 2) Betons permeabilitet over for vandtryk

Undersøgelse af betons eller pastas permeabilitet over for vandtryk er som nævnt tidskrævende. Ofte må der bruges meget tynde prøvelegemer for at opnå en målelig vandgennemstrømning.

Undersøgelse af betons permeabilitet over for vand bygger på Darcy's lov for strømning af vand gennem rør. Darcy's lov angiver sammenhængen mellem væskeflux eller massestrøm og vandtryk:

$$Q = \phi \cdot \frac{A \cdot \Delta h}{L} \quad (8.3)$$

hvor

- Q = massestrøm, (m^3/s)
- ϕ = permeabilitetskoefficient, (m/s)
- A = prøveareal, (m^2)
- Δh = trykniveaufald, (m)
- L = strømningslængde, (m)

Darcy's ligning kendes også fra den grundlæggende hydrauliske teori for laminær strømning af væske gennem et cirkulært rør med konstant tværsnit [95], hvor der i stedet for væskeflux regnes med middelhastigheden af vandstrømmen i røret, som vist i ligning 8.4.

$$V = \frac{G \cdot R^2}{8 \cdot \lambda} \cdot \frac{\Delta h}{L} = \phi \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (8.4)$$

hvor

- V = middelhastighed for væskestrømning (m/s)
- G = tyngdeacceleration (m/s^2)
- R = rørets radius (m)
- λ = væskens kinetiske viskositet (m^2/s)
- Δh = trykniveaufald, (m)
- L = strømningslængde, (m)

ϕ = permeabilitetskoefficient (m/s)

Selv om Darcy's ligning oprindeligt er udledt for laminær strømning af vand gennem rør, har den for små strømningshastigheders vedkommende også vist sig at være anvendelig til at beskrive strømning af vand i porøse materialer, som f.eks. beton. Det fremgår af ligning 8.4, at den numeriske værdi af ϕ både tager formen af materialets porestruktur og den indtrængende væskes egenskaber i betragtning. Permeabilitetskoefficienten ϕ kan kun bestemmes ved forsøg, og den har enheden (m/s).

Det ses i øvrigt, at permeabilitetskoefficienten er proportional med poreradius i anden potens. Hvis middelporestørrelsen for beton således ændres med en faktor på 10, vil permeabilitetskoefficienten ændre sig med en faktor 100. På grund af sin følsomhed er permeabilitetskoefficienten ϕ derfor velegnet til at bedømme ændringer i betoners porestruktur og til at sammenligne forskellige betoners indbyrdes porestruktur og dermed deres tæthed.

Ved at etablere en vandtryksforskel mellem to sider af et prøvelegeme kan man måle den gennemstrømmende væskemængde og dermed direkte beregne permeabilitetskoefficienten ϕ ved brug af Darcy's ligning (8.3). En variant af metoden bygger på bestemmelse af vandindtrængningsdybden i beton, som udsættes for et givet vandtryk over en given periode.

Sammenhængen mellem den specifikke permeabilitetskoefficient Φ i (m²) i Hagen-Poiseuille's ligning 8.2 og permeabilitetskoefficienten ϕ i (m/s) efter Darcy's ligning (8.3) er vist i ligning 8.5, for ikke sammenpresselige væskers vedkommende.

$$\phi = \Phi \frac{d_v \cdot G}{\eta} \quad (8.5)$$

hvor

ϕ = permeabilitetskoefficient, (m/s)

Φ = specifik permeabilitetskoefficient, (m²)

d_v = væskedensitet, (kg/m³)

G = tyngdeacceleration, (m/s²)

η = væskens dynamiske viskositet, (N · s/m²)

I litteraturen rapporteres sporadisk resultater af undersøgelser af betons eller cementpastas tæthed, hvor der benyttes permeabilitetskoefficienter ϕ_n med enheden sek, eller hvad der er det samme (kg/Pa · m · s). Denne nye permeabilitetskoefficient ϕ_n fremkommer, når der i ligning 8.4 arbejdes med trykforskel og gennemstrømmende masse, i stedet for med trykniveaufald og strømningshastigheder. Den nye permeabilitetskoefficient ϕ_n kan udledes af ligning 8.4 ved at indsætte følgende ligninger for henholdsvis tryktab og massestrøm:

$$Q' = d_v \cdot V \quad (8.6)$$

$$\Delta p = d_v \cdot G \cdot \Delta h \quad (8.7)$$

hvor $Q' =$ gennemstrømmende masse per arealenhed og tidsenhed, ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

$d_v =$ væskedensitet, (kg/m^3)

$V =$ middelstrømningshastighed, (m/s)

$\Delta p =$ trykforskel, (N/m^2)

$G =$ tyngdeacceleration, (m/s^2)

$\Delta h =$ trykniveaufald, (m)

Sammenskrives ligning 8.4, 8.6 og 8.7 fås:

$$Q' = \frac{\phi}{G} \cdot \frac{\Delta p}{L} = \phi_n \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (8.8)$$

hvor $\phi_n =$ permeabilitetskoefficient, (s).

Det fremgår af ligning 8.8, at der er følgende sammenhæng mellem de to permeabilitetskoefficienter:

$$\phi = \phi_n \cdot G \quad (8.9)$$

Der benyttes således i litteraturen tre forskellige permeabilitetskoefficienter, Φ , ϕ_n og ϕ . De tre permeabilitetskoefficienter udtrykker i princip det samme, nemlig en værdi for betonens tæthed. Jo større numeriske værdier for permeabilitetskoefficienterne, desto lettere passerer gas eller væske gennem beton.

Uanset hvilken undersøgelsesmetode der bruges, og uanset om der bruges gas eller vand til at bestemme betons eller cementpastas tæthed, er permeabiliteten afhængig af følgende primære parametre:

- 1) v/c -forholdet
- 2) cementens finhed og sammensætning
- 3) tilslagets type, gradering og kornform
- 4) kvaliteten af betonarbejdets udførelse, f.eks. betonens komprimeringsgrad og ensartethed
- 5) lagringsbetingelser ved efterbehandling af betonen før og under forsøget

8.1.2 Flyveaskes virkning på betons permeabilitet

Når der sættes flyveaske til beton ændres alle betonens egenskaber; således også permeabiliteten. Ifølge Helmuth [13] er den vigtigste ændring med hensyn til permeabiliteten, at den letudvaskelige calciumhydroxid ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$), der dannes ved cementreaktionen, bindes og danner mindre opløselige hydrater. Calciumhydroxid kan derfor ikke udvaskes fra flyveaskebeton og derved give anledning til dannelse af porer, som vandet kan trænge igennem, således som det er tilfældet i almindelig beton.

Der er imidlertid kun udført et meget begrænset antal undersøgelser, som har haft til formål at belyse flyveaskes virkning på betons permeabilitet. Langt de fleste undersøgelser er foretaget på mørtel eller pasta af cement og flyveaske. Man har brugt pasta eller mørtel til forsøgene fremfor normal beton, fordi det er mindre ressourcekrævende, og fordi man har antaget, at transport af vand i beton, som fremstilles med tæt tilslag, hovedsagelig foregår gennem pastaen.

Der opstår imidlertid problemer, når resultater, som er opnået ved forsøg med mørtel eller pasta, skal overføres til beton. Det viser sig nemlig, at en ikke uvæsentlig del af stoftransporten i beton foregår i kontaktzonen mellem pasta og tilslag, se f.eks. Walz [74]. Det kan heller ikke forventes, at hærdningsforløbet for cement i pasta vil være identisk med hærdningsforløbet af samme cement i beton. Hughes [85] har da også påpeget, at resultater fra permeabilitetsundersøgelser, der er foretaget på pasta, ikke uden videre kan overføres til beton.

De fleste undersøgelser viser, at flyveaske som regel giver anledning til en væsentlig reduceret permeabilitet hos beton, specielt ved senere aldre. Man antager, at dette er en følge af pozzolanreaktion mellem cement og flyveaske. Ved sådan reaktion antages det, at større porer omdannes til finere porer i cementpastaen. Som beskrevet ovenfor, har Helmuth [13] fremsat en anden teori. Begge teorier kan være rigtige, og kan hver for sig give en del af forklaringen. Nedenfor er omtalt et par undersøgelser, der viser, hvilken usikkerhed der hersker vedrørende flyveaskes virkning på beton og cementpastas permeabilitet og porestruktur.

Manmohan og Metha [82] fremfører, at såfremt flyveaskebeton vandlagres omhyggeligt, vil flyveaskereaktionsprodukterne hjælpe med til at udfylde hulrummene mellem de hydratiserede cementpartikler i betonens cementpastafraktion. Derved formindskes betonens permeabilitet over for vand og aggressive kemikalier.

Bager [88] har undersøgt forskellen i permeabilitet og porestruktur mellem flyveaskecementmørtel og almindelig cementmørtel. Desværre er det en svaghed ved denne undersøgelse, at permeabiliteten kun er bestemt efter 8 og 15 døgn. Undersøgelsen viser for det første, at jo længere mørtlerne vandlagres, desto mindre bliver permeabiliteten, og desto finere porestruktur opnås. Imidlertid fandt Bager, at permeabiliteten af flyveaskemørtler var større end permeabiliteten af cementmørtler. Med hensyn til flyveaskes indflydelse på materialestrukturen fandt Bager ved målinger af isdannelsen i mørtler op til 51 døgn, at porestrukturen af flyveaskemørtler er grovere end porestrukturen af rene cementmørtler. Dette resultat er interessant af to grunde. Dels fordi resultatet delvis er i modstrid med den sædvanlige opfattelse af, at tilsætning af flyveaske til cementpasta medfører finere porestruktur; dels fordi den benyttede metode anses for

at give et mere korrekt billede af materialestrukturen end traditionelle målemetoder, som f.eks. kviksølvporøsitet. Undersøgelse af cementpastas porestruktur ved hjælp af kviksølvporøsitet kræver nemlig udtørring af prøverne, og en sådan udtørring ændrer med stor sandsynlighed selve den struktur, som man ønsker at undersøge.

Marsh, Day og Bonner [84] har studeret permeabilitet og struktur af hærnet cementpasta, som er fremstillet med og uden flyveaske ved lagringstemperaturer mellem 20°C og 65°C og ved aldre mellem 7 og 367 døgn. I undersøgelsen blev pastaprøver lagret i en mættet calciumhydroxidopløsning. Som det fremgår af figur 8.1 viste undersøgelsen blandt andet, at permeabiliteten for flyveaskepasta, som blev lagret ved 20°C, faldt drastisk fra ca. 10^{-11} (m/s) til mindre end 10^{-14} (m/s) i aldersperioden mellem 28 og 90 døgn, hvorimod almindelig pasta uden flyveaske opnåede en permeabilitet på ca. 10^{-12} (m/s) ved alle aldre mellem 10 og 350 døgn. Med hensyn til temperaturens indflydelse fandt forfatterne, at flyveaskepasta langt hurtigere opnåede en lav permeabilitet, nemlig 10^{-14} (m/s), ved høj end ved lav lagringstemperatur. Det fremgår af figur 8.1, at pastaens permeabilitet på grund af flyveaskens tilstedeværelse er ca. tre størrelsesordener mindre end permeabiliteten af identisk lagrede almindelig cementpastaprøver med samme vand/faststof forhold. Denne store forskel kan ifølge Marsh, Day og Bonner ikke forklares alene ved hjælp af den traditionelle antagelse, at der på grund af pozzolanreaktionen er færre store porer i flyveaskepasta end i normal cementpasta. De underbygger deres postulat med strukturanalyser og fremsætter den teori, at den store reduktion i flyveaskepastas permeabilitet, som de har konstateret, skyldes det faktum, at pozzolanreaktionsprodukter delvis blokerer de større porer i pastaen, hvorigennem vandtransporten hovedsageligt foregår.

Dhir, Munday, Ho og Tham [77] fandt, at resultaterne af hidtidige undersøgelser vedrørende permeabilitet og lagringsforhold af flyveaskebeton er modstridende. De konkluderer at:

"The differences in the reported measured permeabilities seem to be a function of the method used for measurements. This suggests that a reliable comparison between two concretes should be based on measurement of their intrinsic permeability, or, more practicably, of their permeability to gas or water under an applied pressure differential."

Dhir et al [77] har undersøgt lagringens betydning for flyveaskebetons vandtæthed ved at måle vandgennemstrømning i beton, når der påføres en trykforskel mellem to sider af samme betonprøvelegeme. De fandt, at for et givet styrkeniveau opnår flyveaskebeton lavere permeabilitet end tilsvarende almindelig beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske.

Det fremgår af ovenstående, at der hersker usikkerhed om årsagerne til flyveaskes virkning på betons permeabilitet og dermed vandtæthed. *Der er enighed om, at tilsætning af flyveaske nedsætter betons permeabilitet, forudsat at betonen lagres tilstrækkeligt længe i våd tilstand. Derimod hersker der uenighed om, i hvor stor udstrækning flyveaske nedsætter betonens permeabilitet. Der savnes i særdeleshed undersøgelser af betydningen af flyveaskebetons sammensætning på dens permeabilitet og dermed dens vandtæthed.*

Som tidligere nævnt, antager den danske betonnorm, at flyveaske gør beton tættere og mere holdbar. DS 411 tager højde for dette ved arbitrært at fastsætte en aktivitetsfaktor $k_a=0,5$ for flyveaskens indflydelse på betons tæthed. D.v.s. at 0.5 kg cement kan erstattes med 1 kg flyveaske, hvis to betoner, alt andet lige, skal opnå samme tæthed. Værdien af denne holdbarheds- eller

tæthedsfaktor angiver således, at halvdelen af flyveaskemængden i holdbarhedsmæssig henseende kan medregnes som cement ved beregning af betons effektive vand/cement tal. Der findes imidlertid ingen dokumenteret begrundelse for betonnormens begrænsninger af flyveaskeindholdet med hensyn til betonens holdbarhed.

Betonnormen henviser heller ikke til nogen metode, ved hjælp af hvilken man kan undersøge en foreliggende betons vandtæthed. I modsætning hertil angiver den vesttyske betonnorm, DIN 1048, Blatt 1, følgende metode til kontrol af betonens vandtæthed:

Efter 28 døgns fugtig lagring udsættes den ene flade af et 20 x 20 x 20 cm betonprøvelegeme for et vandtryk på 1 atm i 2 døgn, efterfulgt af et tryk på 3 atm. i 1 døgn og 7 atm. i 1 døgn, medens den modstående flade befinder sig ved atmosfærisk tryk. Herefter spaltes prøven, og indtrængningsdybden for vandet bestemmes ved visuel inspektion. Hvis indtrængningsdybden er mindre end 5 cm, har tyske erfaringer vist, at betonvægge, der er mere end 15 cm tykke, vil være tilstrækkeligt vandtætte for de fleste praktiske formål, d.v.s. når vandtrykket på tryksiden ikke overstiger 12 m.

Den vesttyske standardmetode er utvivlsomt mere praktisk, end den er videnskabelig; men den er ganske velegnet til at sammenligne forskellige betoners tæthed overfor vandgennemtrængning. Metoden er blandt andet benyttet i undersøgelser af Murata [89] og Andersson [90].

Murata [89] bruger dog delvis udtørrede prøvelegemer, dels for at simulere forholdene i praktisk konstruktionsbeton, dels for at opnå sikker visuel bestemmelse af vandindtrængningsfrontens dybde. Brugen af halvtørre prøvelegemer komplicerer imidlertid indtrængningsforholdene, fordi indtrængningen af vand i halvtør beton både foregår ved diffusion og ved strømning. Murata fandt i sin undersøgelse af almindelig beton uden tilsætning af flyveaske, at omhyggelig lagring umiddelbart efter fremstilling af beton er meget vigtigt for betons vandtæthed.

Andersson [90] har undersøgt indflydelsen af forskellig lagringsbetingelser på flyveaskebetons tæthed. Figurene 8.2a og 8.2b viser den målte indtrængningsdybde som funktion af lagringsbetingelserne for henholdsvis almindelig beton og for beton med 30% flyveaske regnet i vægtprocent af cementmængden. Det fremgår også af denne undersøgelse, at omhyggelig vandlagring er afgørende både for vandtæthed af almindelig beton og af flyveaskebeton.

8.2 FORSØGSPLAN

Det væsentligste formål med denne del af det foreliggende projekt har været at sammenligne vandtæthed hos flyveaskebetoner, som blev fremstillet med systematisk varierede c/v - og f/v -forhold. Vandtæthed måles ved hjælp af den standardiserede vesttyske metode DIN 1048, der er beskrevet i afsnit 8.4.

Undersøgelsen er blandt andet udført for at klarlægge, om den danske betonnorms mængdemæssige begrænsninger for brug af flyveaske er berettigede for hvad angår vandindtrængning, eller om de bør revideres. Normens grænser for anvendelse af flyveaske er skitserede i figur 8.3.

For at kunne sammenligne de i den foreliggende undersøgelse målte vandindtrængningsdybder med resultater af permeabilitetsmålinger på beton, som er opnået af andre forskere, er der udregnet en permeabilitetskoefficient for hver af de undersøgte betoner på grundlag af de målte vandindtrængningsdybder.

En nærmere analyse af resultater fra et tidligere vandindtrængningsforsøg, som er foretaget af Møller [91], viser, at permeabilitetskoefficienten for flyveaskebeton tilsyneladende kan bestemmes ved hjælp af en ligning af typen 8.10.

$$\phi = \exp^{A_6 \cdot \left[\frac{c + k_v \cdot f}{v} + E_6 \right]} \quad (8.10)$$

hvor

ϕ = permeabilitetskoefficient for vand, (m/s)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

A_6, E_6 = konstanter, som afhænger af de benyttede delmaterialer og betonens lagringsforhold

k_v = aktivitetsfaktor for flyveaske med hensyn til vandtæthed

Man bemærker ligheden mellem ligning 8.10 for vandpermeabilitet og ligning 7.7 for kloridiondiffusion. Denne lighed bør dog ikke forlede nogen til at drage videregående konklusioner. Set fra et fysisk-kemisk synspunkt er de to transportmekanismer vidt forskellige.

Det ønskes undersøgt, om vandpermeabilitet af flyveaskebeton generelt kan udregnes ved hjælp af ligning 8.10, hvor flyveaskens bidrag til betonens tæthed med hensyn til vandgennemtrængning fremgår af flyveaskens aktivitetsfaktor k_v .

Det var oprindelig meningen at undersøge vandindtrængning i nøjagtigt samme betoner, som blev anvendt ved de tidligere beskrevne styrke- og kloridundersøgelser, men på grund af begrænset apparaturkapacitet i forbindelse med den meget tidskrævende undersøgelse af betons vandtæthed (se afsnit 8.6.1), har det ikke været praktisk muligt at undersøge alle fire serier af flyveaskebeton for vandtæthed. Det var nødvendigt at begrænse undersøgelsen til kun at omfatte serie 1, der blev fremstillet med Lavalkali cement og Asnæs flyveaske, samt til serie 3, der blev fremstillet med Slite cement og Asnæs flyveaske. Vandindtrængning i beton, som blev fremstillet med Lavalkali cement og Asnæs flyveaske, dvs. serie 1, er undersøgt efter 28 og 56 døgns forudgående vandlagring, medens vandintrængning i beton fremstillet med Slite cement og Asnæs flyveaske, dvs. serie 3, kun er undersøgt efter 28 døgns forudgående vandlagring. Forsøgsprogrammet er skitseret i nedenstående tabel.

TYPE	1. serie	3. serie
Cement	Lavalkali	Slite
Flyveaske	Asnæs	Asnæs

8.3 MATERIALER, PROPORTIONERING OG STØBNING

Alle betoner blev fremstillet med samme delmaterialer, som beskrevet i afsnit 6.6, og proportioneringen blev foretaget ved hjælp af den tidligere beskrevne modificerede DOE-proportioneringsmetode, se afsnit 6.1. Alle betoner er proportioneret for samme konsistens, svarende til et sætmål på ca. 60 mm, og denne konsistens er opnået for de cement- og flyveaskerige betoner ved at fastholde det frie vandindhold og samtidig forøge bearbejdigheden ved at tilsætte superplastificeringsstoffet CeMix.

Blanderecepter for betoner til vandindtrængningsundersøgelsen er stort set identiske med tilsvarende recepter for betoner, der blev brugt til undersøgelse af styrke og kloridindtrængning. Aktuelle blanderecepter for de to serier af beton, som blev fremstillet med henholdsvis Lavalkali og Slite cement samt Asnæs flyveaske er vist i tabel 8.2.

Fremstilling af alle betoner, udstøbning af prøvelegemer, samt undersøgelse af friske betoners egenskaber og hærdnede betoners trykstyrker er sket efter samme procedurer, som omtalt i kapitlerne 6 og 7. Antallet udstøbte cylindre til bestemmelse af hver betonblandings trykstyrke er dog reduceret til 12 stk., der prøves med 6 stk efter henholdsvis 28 og 56 døgn.

Ved udstøbning af prøvelegemer til vandindtrængningsforsøgene blev der brugt 6 kubiske terningforme med en sidelængde på 200 mm. Af hensyn til materialeforbruget blev højden af de udstøbte prøvelegemer dog reduceret til 120 mm ved hjælp af stålindlæg i støbeformene. De udstøbte terninger blev vibreret 15 sek. på et vebebord, hvorefter de blev afdækket med polyethylenfolie. Efter ca. 20 timers hærdning blev prøvelegemerne afformet og vandlagret ved 20°C, indtil prøvningen for vandindtrængning påbegyndtes.

8.4 EKSPERIMENTIELLE METODER

8.4.1 Metode til måling af indtrængningsdybde for vand i beton.

Betonernes tæthed overfor indtrængning af vand under tryk er undersøgt efter 28 og 56 døgns vandlagring i henhold til DIN 1048 [101] efter følgende procedure:

- Bunden af de udstøbte terninger slibes med stålborste, således at tilslaget blotlægges på det areal, der skal udsættes for vandtryk.
- Til hver termin placeres og fastspændes tre prøvelegemer i standardapparatet, som er vist i figur 8.4. Prøvelegemerne udsættes for forskellige vandtryk i følgende orden:

1 atm. i 2 døgn, efterfulgt af:
 3 atm. i 1 døgn, efterfulgt af:
 7 atm. i 1 døgn.

- c) Efter de fire døgn forløb flækkes prøvelegemerne, og vandindtrængningsprofilen optegnes, idet den maksimale indtrængningsdybde samtidig bestemmes.

På grund af problemer med tætheden af apparaturet ved 7 atm. vandtryk, blev betonerne dog kun udsat for 6 atm. tryk under det sidste døgn af forsøgsproceduren.

Med de opnåede middelindtrængningsdybder for hver enkelt betonblanding udregnes en permeabilitetskoefficient, som angiver, hvor let betonen tillader passage af vand under tryk.

Ligningen for beregning af permeabilitetskoefficienten ϕ på grundlag af de målte indtrængningsdybder kan udledes af Darcy's ligning 8.4,

$$V = \phi \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (8.4)$$

hvor V = middelhastighed for strømning af vand i beton, (m/s)

Δh = trykniveaufald, (m)

L = strømningslængde, (m)

ϕ = permeabilitetskoefficient, (m/s)

Indføres i ligning (8.4), at middelhastigheden for strømning af vand i beton (V) også kan skrives som ændringen i indtrængningsdybde (dx) per tidsenhed (dt), og indsættes x for strømningslængden L , dvs. $L = x$, fås differentialligning 8.11:

$$x \cdot dx = \phi \cdot \Delta h \cdot dt \quad (8.11)$$

Integreres ligning 8.11 fra tiden 0 til tiden t , svarende til indtrængningsdybder på 0 respektive $x_{\max,v}$ som observeret, fås følgende ligning for den maksimale indtrængningsdybde ($x_{\max,v}$):

$$x_{\max,v} = \sqrt{2\phi \cdot \Delta h \cdot t} \quad (8.12)$$

Ligning 8.12, er en tilnærmet løsning, idet der ikke tages hensyn til, at permeabilitetskoefficienten ϕ ændrer sig med tiden under forsøget.

Da den samlede prøvning foregår ved flere trykniveauer Δh_i , hvor nye tryk påføres efter påvirkning i forskellige tidsintervaller, kan den totale indtrængningsdybde beregnes ved hjælp af ligning (8.13):

$$x_{\max, v} = \sqrt{2\phi} \cdot \sqrt{(\Delta h_1 t_1 + \Delta h_2 t_2 + \Delta h_i t_i)} \quad (8.13)$$

Indføres nu i ligning 8.13 de reelle værdier for tryk og tid, som benyttes til bestemmelse af vandindtrængningsdybden i henhold til DIN 1048 med ovennævnte modifikation for trykket under det sidste døgn af prøvningen, får man følgende ligning til bestemmelse af betonernes permeabilitetskoefficient:

$$\phi \approx \left[\frac{x_{\max, v}}{4360} \right]^2 (m/s) \quad (8.14)$$

8.5 EKSPERIMENTELLE RESULTATER

8.5.1 Friske betoners sammensætning og egenskaber

Blandingsrecepterne for de friske betoner og disse betoners egenskaber, samt de doserede mængder plastificeringsstof, er vist i tabel 8.2 og i tabellerne 8.3a og 8.3b.

8.5.2 Hærdnede betoners trykstyrker

Betonernes middeltrykstyrker og spredningen på styrkerne efter henholdsvis 28 og 56 døgns vandlagring er vist i tabellerne 8.4a og 8.4b. De målte styrker og spredninger er fundet ved prøvning af 6 stk 60/120 mm cylindre ved hver termin.

8.5.3 Indtrængningsdybder for vand

Gennemsnitlige vandindtrængningsdybder med tilhørende spredninger for de to betontyper, som er undersøgt i denne del af projektet, er vist i tabellerne 8.5a og b. Middelindtrængningsdybderne for vandet er desuden optegnet som citydiagrammer i figurerne 8.5a-c.

8.6 DISKUSSION

8.6.1 Materialer og blanderecepter for betoner til vand-indtrængningsforsøg

Som tidligere nævnt, var det nødvendigt at nedsætte antallet af betonblandinger i forbindelse med vandindtrængningsforsøgene, blandt andet fordi der måtte fremstilles flere blandinger end planlagt, da mange blandinger måtte prøves to gange på grund af utætheder i apparaturet.

Der blev fremstillet to serier beton med kombinationer af Slite og Lavalkali cement såvel med som uden Asnæs flyveaske. Blanderecepterne for betonerne i denne del af undersøgelsen er i det store og hele identiske med tilsvarende blanderecepter i de styrke- og kloridundersøgelser, der er beskrevet i kapitlerne 6 og 7. Det frie vandindhold og doseringen af plastificeringsstof er dog justeret i enkelte af de nye blandinger for at opnå et sætmål på 60-90 mm hos den friske beton.

Umiddelbart før hver støbning er de endelige blanderecepter, der er præsenterede i tabel 8.2, justeret for det aktuelle fugtindhold i tilslaget.

8.6.2 Friske betoners egenskaber

Som det fremgår af tabellerne 8.3a og b, er der stort set opnået samme sætmål for alle de friske betonblandinger. Med hensyn til de benyttede frie vandindhold, dosering af plastificeringsstof, samt opnåede sætmål gælder samme bemærkninger, som angivet i afsnit 6.9.2 for styrke og kloridindtrængningsundersøgelserne.

Det er undersøgt, om det er lykkedes at opnå samme egenskaber for de friske betoner i vandindtrængningsforsøget, som man opnåede for de friske betoner i styrke- og kloridundersøgelserne, således at betonerne i de to undersøgelser er direkte sammenlignelige. Undersøgelsen er foretaget ved hjælp af SAS proceduren GLM, der tidligere er beskrevet i afsnit 6.9.3. Som model antages, at de friske betoners egenskaber kan beskrives som en funktion af de benyttede c/v - og f/v -forhold, samt af betonernes indhold af frit vand og plastificeringsstof.

Tabel 8.6 giver en oversigt over de væsentligste resultater af den statistiske analyse, der i sin helhed er medtaget i bilagsrapporten. I programmet og i tabel 8.6 henviser betegnelsen AFD til opdelingen af resultaterne i de to afdelinger (AFD), nemlig styrke- og kloridforsøg, respektive vandindtrængningsforsøg. R^2 i tabel 8.6 angiver, hvor stor en del af variationen af den aktuelle egenskab, som den benyttede model kan forklare. Værdien af $P > F$ angiver, om der er en signifikant forskel på den aktuelle egenskab i de to dele af projektet. Hvis $P > F$ er mindre end 0.05 betyder det, at der er signifikant forskel. Omvendt, hvis værdien af $P > F$ er væsentligt større end 0.05, er der ingen signifikant forskel på den undersøgte egenskab i de to dele af projektet. Som det fremgår af tabel 8.6 er $P > F$ langt større end 0.05 for alle undersøgte egenskaber. Dvs. analysen af de friske betoners egenskaber viser, at der er opnået og målt samme sætmål, densitet og luftindhold i betonerne i forsøg vedrørende styrke og kloridindtrængning, som i vandindtrængningsforsøget.

Det kan altså konstateres, at de friske betoners egenskaber i de to undersøgelser, der er rapporteret i afsnittene 6, 7 og 8, ikke er signifikant forskellige. Med hensyn til friske betoners egenskaber er resultatet af de to undersøgelser derfor direkte sammenlignelige.

8.6.3 Hærdnede betoners trykstyrker

Middeltrykstyrkerne for betoner, der fremgår af tabellerne 8.4a og b, er som nævnt bestemt i hvert enkelt tilfælde ved prøvning af 6 stk 60/120 mm cylindre. For begge forsøgsseriers vedkommende er trykstyrkene bestemt med en gennemsnitlig variationskoefficient på 5-6% både efter 28 og 56 døgns vandlagring.

Ligesom for de friske betoners egenskabers vedkommende, der er beskrevet i afsnit 8.6.2, er det undersøgt, om styrkerne af de hærdnede betoner, som er fremstillet til vandindtrængningsforsøgene, er signifikant forskellige fra styrkerne for tilsvarende hærdnede betoner, som er fremstillet til styrke og kloridindtrængningsforsøgene. Analysemetoden er identisk med den ovenfor beskrevne. Ved analysen bruges følgende simple model for trykstyrke af flyveaskebeton:

$$f_c = A_1 \frac{c}{v} + B_1 \frac{f}{v} + E_1 \quad (8.15)$$

hvor f_c = trykstyrke, (MPa)

c = cementindhold, (kg/m³)

f = flyveaskeindhold, (kg/m³)

v = frit vandindhold, (kg/m³)

A_1, B_1, E_1 = konstanter, som afhænger af betonernes delmaterialer og lagringsforhold

Tabel 8.7 giver en oversigt over de væsentligste resultaterne af den statistiske analyse, der i sin helhed er medtaget i bilagsrapporten.

Resultatet af den statistiske analyse viser, at den benyttede model kan forklare mellem 94% og 96% af variationen af flyveaskebetonernes styrke. Der opnås ikke nogen signifikant bedre model, selvom styrkeresultaterne opdeles efter, om prøvelegemerne er fremstillet til styrke- og kloridforsøget eller til vandindtrængningsforsøget.

Det kan altså konstateres, at de hærdnede betoners egenskaber i de to dele af projektet ikke er signifikant forskellige. Med hensyn til de hærdnede betoners trykstyrker er resultaterne fra de to dele således direkte sammenlignelige.

8.6.4 Indtrængningsdybde for vand efter DIN 1048

Den vesttyske betonnorm DIN 1048 kræver, at betonens overfladehud skal fjernes og tilslaget skal frilægges, før betonprøvernes vandtæthed bestemmes.

I et forprojekt til det her foreliggende projekt blev det undersøgt, om denne fjernelse af betonhuden kan udelades, således at betonhudens modstand mod vandindtrængning medtages ved bedømmelsen af betonernes tæthed over for vand. Disse forsøg viste imidlertid klart, at hvis overfladehuden ikke fjernes, bliver spredningen på indtrængningsdybderne for prøvelegemer fra samme betonblanding meget stor. En undersøgelse, der tager hensyn til betonhudens betydning, vil derfor kræve et langt større antal prøver fra hver betonblanding, end det har været muligt at undersøge med det eksisterende apparatur. Ved fjernelse af overfladehuden viste undersøgelsen, at spredningen på vandindtrængningsdybderne for de 6 prøvelegemer fra hver betonblanding faldt så meget, at det blev fundet forsvarligt at halvere antallet af prøvelegemer til tre ved hver prøvning.

I et andet forprojekt blev det undersøgt, om vandindtrængningsretningen i forhold til betonens udstøbningsretning for de benyttede terninger har nogen betydning for, hvor langt vandet trænger ind i betonerne, når de prøves efter DIN 1048. Disse forsøg viste klart, at det ikke var muligt at registrere nogen signifikant forskel i de målte indtrængningsdybder gennem top, bund eller side af de udstøbte terninger. Af hensyn til ensartethed og sammenlignelighed med klorid-indtrængningsforsøget, besluttedes det dog at måle vandindtrængningen gennem bunden af de udstøbte terninger.

De to forforsøg har vist, at vandindtrængningsdybden i de benyttede terninger er uafhængig af indtrængningsretningen i forhold til støberetningen, og at det er nødvendigt at fjerne betonhuden samt at frilægge tilslaget, før der foretages en undersøgelse af vandindtrængningsdybden i beton.

Med de benyttede prøvelegemer kan der måles indtrængningsdybder på maksimalt 120 mm, og ved metoden kan indtrængningsdybden højst bestemmes med en nøjagtighed på 1-2 mm. Dette svarer derfor også til den mindste målelige indtrængningsdybde.

8.6.4.1 Cementtypens indflydelse på vandindtrængningsdybden

Betonerne, der blev brugt i forbindelse med vandindtrængningsundersøgelsen, er enten fremstillet med almindelig Slite Portland cement eller med Aalborg Lavalkali cement. Det fremgår af de målte vandindtrængningsdybder for de to serier, der er vist i tabellerne 8.5a og b, at der tilsyneladende ikke er stor forskel på indtrængningsdybder i beton, som er fremstillet med de to cementer. Derfor er der foretaget en statistisk analyse for at undersøge, om cementtypen har nogen signifikant indflydelse på de fundne vandindtrængningsdybder. Dvs. det er undersøgt, om resultaterne af de to forsøgsserier, med hensyn til vandindtrængning, kan slås sammen i de videre undersøgelser, uden at der skelnes mellem de to cementtyper.

Som det tidligere var tilfældet, er den statistiske analyse udført ved hjælp af SAS proceduren GLM, der er omtalt i afsnit 6.9.3. Der bruges følgende simple matematiske model for vandindtrængningsdybden i beton efter 28 døgns vandlagring, her kaldet *dybde 28*:

$$dybde\ 28 = A_7 \frac{c}{v} + B_7 \frac{f}{v} + E_7 \quad (8.16)$$

hvor c = betonens cementindhold, (kg/m^3)
 f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m^3)
 v = betonens frie vandindhold, (kg/m^3)
 A_7, B_7 og E_7 = konstanter, der afhænger af betonens delmaterialer

Tabel 8.8 giver en oversigt over de væsentligste resultater af den statistiske analyse, der i sin helhed er medtaget i bilagsrapporten. Det fremgår af analysen, at den model, der er beskrevet i ligning 8.16, kan forklare 71% af variationen på de målte indtrængningsdybder. Der opnås ikke nogen bedre overensstemmelse, selvom resultaterne deles op efter cementtype. Indtrængningsdybden synes altså ikke at være afhængig af, om flyveaskebeton fremstilles med almindelig Slite Portland cement eller med Lavalkali cement. I de videre analyser vedrørende vandindtrængning, vil der derfor ikke blive skelnet mellem resultater, som er opnået med de to cementtyper. Dvs. de målte indtrængningsdybder for betoner, som er fremstillet med Slite cement, og de målte indtrængningsdybder for beton, som er fremstillet med Lavalkali cement, er slået sammen til én serie i de videre undersøgelser.

Det kan således konstateres, at det med hensyn til vandtæthed er ligegyldigt, om der benyttes Lavalkali cement eller almindelig Slite Portland cement til fremstilling af flyveaskebeton med Asnæs flyveaske. Betonernes tæthed er ens for betoner med samme alder, og som er fremstillet med samme c/v - og f/v forhold.

8.6.4.2 Startvandlagringstidens indflydelse på vandindtrængningsdybden

Betonerne i den forsøgsserie, som blev fremstillet med Lavalkali cement og Asnæs flyveaske, er prøvet efter både 28 og 56 døgn vandlagring ved 20°C . Det fremgår af de målte vandindtrængningsdybder, der er vist i tabel 8.5a og i citydiagrammerne i figur 8.5a-b, at en forøgelse af betonens lagringstid fra 28 døgn til 56 døgn tilsyneladende ikke ændrer betonernes tæthed over for vandindtrængning. Derfor er der udført en statistisk analyse for at undersøge om længden af lagringstiden, før prøverne udsættes for vandtryk, har nogen signifikant betydning for vandindtrængningsdybden. Dvs., det er undersøgt, om alle målte indtrængningsdybder for beton, der er fremstillet med Lavalkali cement, kan slås sammen i de videre undersøgelser, uden at der skelnes mellem startvandlagringstidspunkterne. Som det tidligere har været tilfældet er den statistiske undersøgelse udført ved hjælp af SAS proceduren GLM, og der er benyttet samme simple model for indtrængningsdybden, som blev brugt i forbindelse med ovennævnte analyse af cementtypens indflydelse, dvs. ligning 8.16.

Tabel 8.9 giver en oversigt over resultaterne af den statistiske analyse, som i sin helhed er medtaget i bilagsrapporten. Det fremgår af tabel 8.9, at der ikke opnås nogen bedre overensstemmelse for vandets indtrængningsdybde, selvom resultaterne opdeles efter, om betonen har været vandlagret i 28 eller 56 døgn før vandtrykforsøgets påbegyndelse. Med andre ord viser analyseresultaterne, at betonens vandlagringstid ikke er signifikant for betonernes tæthed. Dette

resultat er bemærkelsesværdigt, fordi en længere hydratiseringstid for beton normalt anses for at være ensbetydende med lavere permeabilitet. Konklusionen kan dog kun gælde under forudsætning af, at betonen vandlagres i en vis minimumstid. Møller [91], som tidligere undersøgte 2 til 28 døgn gamle flyveaskebetoner, fandt, at flyveaskebetons tæthed øger med øgende betonalder op til 28 døgn. Undersøgelsen i den foreliggende rapport viser, at flyveaskebetoners tæthed ikke forbedres yderligere ved vandlagring mellem 28 og 56 døgn, før betonens vandtæthed undersøges.

Det fremgår af citydiagrammerne i figurerne 6.14a og figur 6.14c, over de undersøgte betoners trykstyrker, at der sker en kraftig styrketilvækst i perioden mellem 28 og 56 døgn. Det er tidligere konstateret, at denne styrketilvækst skyldes pozzolanreaktion mellem flyveaske og den ved cementhydratiseringen dannede calciumhydroxid. Mærkeligt nok synes dette ikke at have nogen betydning for betonernes tæthed mod vandindtrængning.

Den normale antagelse, at flyveaske pozzolanreaktion både medfører større betonstyrke og lavere vandpermeabilitet, kan derfor ikke bekræftes på grundlag af de resultater, der er opnået i den foreliggende undersøgelse. Den del af porestrukturen, som er ansvarlig for vandtransport i beton, påvirkes tilsyneladende slet ikke af flyveaskens pozzolanreaktion.

Med de benyttede materialer kan det konstateres, at flyveaskebetons tæthed over for vandindtrængning ikke er afhængig af, om betonerne vandlagres i 28 eller 56 døgn, før de udsættes for vandtryk.

Med de benyttede materialer har hverken cementtype eller lagringstid altså nogen signifikant betydning for, hvor langt vand trænger ind i beton. I forbindelse med opbygningen af en permeabilitetsmodel for flyveaskebeton er resultaterne fra de to forsøgsserier derfor slået sammen uberoende af betonernes lagringstid og den benyttede cementtype. Betonernes vandpermeabilitet er udelukkende beregnet som funktion af deres c/v - og f/v -forhold.

8.6.5 Permeabilitetskoefficienter for beton overfor vandindtrængning

På grundlag af de målte indtrængningsdybder er permeabilitetskoefficienterne for de i forsøget indgående betoner udregnet og optegnet i tabellerne 8.10a og 8.10b. Det fremgår af disse tabeller, at de undersøgte betoner opnår permeabiliteter mellem $0.05 \cdot 10^{-12}$ og $758 \cdot 10^{-12}$ m/s. Laveste permeabiliteter er fundet for store c/v -forhold og flyveaskerige betoner. De mindste permeabiliteter, der kan måles ved den benyttede metode, er imidlertid $0.05 \cdot 10^{-12}$ (m/s). Det svarer til en mindste indtrængningsdybde på 1 mm, som er lig med usikkerheden ved bestemmelsen af indtrængningsdybden. Største permeabilitet, der kan måles ved metoden er ca. $758 \cdot 10^{-12}$ (m/s), hvilket svarer til største dimension af de benyttede prøvelegemer nemlig 120 mm. Det må således konstateres, at det er undersøgelsesmetoden i sig selv, der sætter begrænsningen for de mindste og største resultater, der er opnået i forbindelse med undersøgelsen. Dette er beklageligt, men det bemærkes, at betoner med så små indtrængningsdybder som 1-2 mm i henhold til DIN 1048 kan betragtes som værende "vandtætte". Derfor kan de rapporterede undersøgelsesresultater forhåbentlig alligevel have praktisk interesse til trods for metodens måletekniske begrænsninger.

8.6.5.1 Permeabilitet af beton uden flyveaske

Det er undersøgt, om der kan opstilles en simpel matematisk sammenhæng mellem målte permeabilitetskoefficienter og betonblandingerne sammensætning. Opbygning og test af modellerne er foretaget ved hjælp af SAS procedurene REG, RSQUARE, STEPWISE m.fl., som er beskrevet af J. Sall i SAS Technical Report A-102 [94].

Det er herved fundet, at permeabilitetskoefficienter for vand i beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske, kan bestemmes ved hjælp af en af følgende to ligninger:

$$\phi = A_8 \left[\frac{v}{c} \right]^5 \quad (8.17)$$

eller

$$\phi = \exp^{[A_9 \frac{c}{v} + E_9]} \quad (8.18)$$

hvor ϕ = permeabilitetskoefficient for vand i beton, (m/s)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

A_8, A_9 og E_9 = konstanter for benyttede delmaterialer

Bedste værdier for konstanterne A_8, A_9 og E_9 og tilsvarende korrelationskoefficienter for de to ligninger til beregning af permeabilitetskoefficienter for beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske, er vist i ligningerne 8.19a og b. Det fremgår af disse ligninger, at potensfunktionen i ligning 8.17 er en bedre model til beregning af permeabilitetskoefficienter for beton uden flyveaske end eksponentialfunktionen i ligning 8.18. I undersøgelserne indgår ialt 15 betoner uden flyveaske, og der er ikke fundet andre simple modeller til beregning af permeabilitetskoefficienterne for beton uden flyveaske, end de to ovennævnte.

$$\phi = 2.8 \cdot 10^{-10} \left[\frac{v}{c} \right]^5 \quad R^2 = 0.85 \quad (8.19a)$$

$$\phi = \exp^{[-4.3 \cdot \frac{c}{v} - 17.4]} \quad R^2 = 0.76 \quad (8.19b)$$

hvor ϕ = betonpermeabilitetskoefficient over for vand, (m/s)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

Det bemærkes, at permeabilitetskoefficienten for beton under vandtryk ændrer sig med en femte potens af v/c -forholdet, mens betonstyrken i henhold til Bolomey's lov ændrer sig med det reciprokke v/c forhold i første potens.

Potensfunktionen for beregning af permeabilitetskoefficienter for indtrængning af vand i almindelig beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske, kan ikke umiddelbart udvides til at beskrive vandpermeabiliteten af flyveaskebeton. Som vi senere skal se, er det derimod muligt at beskrive permeabiliteten både af almindelig beton og af flyveaskebeton ved hjælp af en eksponentialfunktion, der for beton, som fremstilles uden tilsætning af flyveaske, fremgår af ligning 8.18. Eksponentialfunktionen er i øvrigt den eneste fundne simple model, som kan beskrive permeabilitet for vand både i almindelig beton og i flyveaskebeton.

8.6.5.2 Permeabilitet af flyveaskebeton

Det er undersøgt, om permeabilitetskoefficienten for de 28- eller 56-døgns vandlagrede betoner, der er fremstillet med kombinationer af Slite- eller Lavalkali cement og Asnæs flyveaske, kan beregnes ved hjælp af følgende model for permeabilitetskoefficienten, som beskrevet i ligning 8.10.

$$\phi = \exp^{A_6 \cdot \left[\frac{c + k_v \cdot f}{v} + E_6 \right]} \quad (8.10)$$

hvor

ϕ = permeabilitetskoefficient for vand, (m/s)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

A_6, E_6 = konstanter, som afhænger af de benyttede delmaterialer

k_v = aktivitetsfaktor for flyveaske med hensyn til vandtæthed

Som tidligere nævnt, er modellen, der beskrives ved hjælp af ligning 8.10, fundet ved analyse af forsøgsresultaterne fra en undersøgelse, der tidligere er udført af Møller [91]. Det ses af ligning 8.10, at modellen er en udvidelse af den tidligere fundne eksponentialfunktion for ϕ , der er foreslået som en mulighed i ligning 8.18 for beton uden flyveaske. I modellen for flyveaskebeton tages hensyn til flyveaskens bidrag til betonens tæthed over for vand ved at medtage det aktuelle f/v forhold multipliceret med en aktivitetsfaktor k_v . Undersøgelsen af permeabilitetsmodellen for flyveaskebeton er foretaget ved hjælp af SAS, og resultatet af analysen fremgår af ligning 8.20. Med den fundne model er der opnået en korrelationskoefficient på 0.73.

$$\phi = \exp^{-4.3 \left[\frac{c + 0.31 \cdot f}{v} + 4.0 \right]} \quad (8.20)$$

Det fremgår af ligning 8.20, at tætheden af flyveaskebeton er en funktion af et ækvivalent v/c forhold, hvor aktivitetsfaktoren for tætheden med hensyn til flyveaske, k_v , er fastlagt til ca. 0.3, og ikke til 0.5, som angivet i den danske betonnorm. Det vil altså sige, at det med hensyn til permeabilitet over for vand, i den foreliggende undersøgelse er fundet, at den danske norms bestemmelser ligger på den usikre side.

8.7 KONKLUSION VEDRØRENDE FLYVEASKBETONERS VANDTÆTHED

Til sammenligning af vandtætheden hos forskellige flyveaskebetoner er benyttet en forsøgsmetode, som er beskrevet i den vesttyske betonnorm, DIN 1048. Udstøbte og hærdnede betonprøvelegemer udsættes for vand under tryk efter et veldefineret program. Herefter spaltes prøverne og indtrængningsdybden for vandet bestemmes visuelt. Metoden er utvivlsomt mere praktisk end videnskabelig. Det er således tvivlsomt, om den giver et korrekt billede af betons absolutte vandtæthed og dermed af betons virkelige vandpermeabilitet; men metoden er brugbar til at sammenligne forskellige betoners indbyrdes tæthed over for vandindtrængning.

Undersøgelsen viser blandt andet, at betoners overfladehud udgør en væsentlig barriere mod vandindtrængning. For almindelig beton, som ikke har fået nogen særlig overfladebehandling, vil vandindtrængning imidlertid i praksis altid være bestemt af huller og udstøbningsfejl i overfladen, medens eventuel tilstedeværelse af en overfladehud er af mindre betydning. I undersøgelsen har man derfor fjernet overfladehuden og blotlagt tilslaget, før betonerne blev udsat for det foreskrevne vandtryk.

Undersøgelsens resultater viste ikke nogen signifikant forskel i de målte indtrængningsdybder, uanset om vandindtrængning foregik gennem top, bund eller side af prøvelegemer udstøbt af samme blanding.

Der blev undersøgt beton fra to serier, som blev fremstillet med henholdsvis almindelig Slite Portland cement og med Aalborg Lavalkali cement. Begge blev fremstillet med Asnæs flyveaske. Betonernes vandtæthed blev undersøgt efter 28 døgns vandlagring for begge seriens vedkommende, og tætheden af beton, som blev fremstillet med Lavalkali cement, blev desuden undersøgt efter 56 døgns vandlagring.

Det konstateredes, at hverken forskelle i cementtype mellem almindelig Portland cement og Lavalkalicement eller forskelle i vandlagringstid mellem 28 og 56 døgn, ændrede betonernes tæthed over for vandindtrængning. Derimod registreredes en markant styrketilvækst for betonerne i vandlagringsperioden mellem 28 og 56 døgn. Det må antages, at denne styrketilvækst skyldes pozzolanreaktion. Pozzolanreaktionen øger altså betonernes styrke, men reaktionen synes ikke at påvirke betonernes modstandsevne over for indtrængning af vand. Den del af betons porestruktur, der er ansvarlig for vandtransport, synes således at være upåvirket af pozzolanreaktionen, der altid foregår ved senere alder. Tidligere forsøg (91) har vist, at der sker en markant forøgelse af flyveaskebetoners tæthed i perioden mellem 2 og 28 døgn. Denne tætning af betonstrukturen ved tidlig alder kan næppe tillægges flyveaskens kemiske reaktion med cement

i betonen. Den skyldes antagelig fysiske forhold. Den generelle antagelse, at pozzolanreaktion altid skulle medføre en finere og tættere betonstruktur og dermed lavere permeabilitet over for vand, kan altså ikke bekræftes af resultaterne af de i det foreliggende projekt udførte forsøg.

Der er fundet, at vandpermeabilitet af de betoner, der i dette projekt blev fremstillet uden tilsætning af flyveaske, bedst kan beskrives ved hjælp af følgende ligning (8.17):

$$\phi = A_8 \left[\frac{v}{c} \right]^5 \quad (8.17)$$

hvor ϕ = permeabilitetskoefficient for vandindtrængning i beton, (m/s)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

A_8 = konstant beroende på de aktuelle delmaterialer

For beton, som blev fremstillet med Lavalkali- eller almindelig Slite Portland cement var A_8 lig med $2.8 \cdot 10^{-10}$, og der blev opnået en korrelationskoefficient for ligning 8.17 på 0.85.

Den bedste beskrivelse af permeabilitet for beton, som fremstilles med eller uden flyveaske opnås imidlertid ved brug af følgende ligning:

$$\phi = \exp \left[A_6 \left(\frac{c + k_v \cdot f}{v} + E_6 \right) \right] \quad (8.10)$$

hvor ϕ = betons permeabilitetskoefficient med hensyn til vandindtrængning, (m/s)

c = betonens cementindhold, (kg/m³)

f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)

v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

A_6 og E_6 = konstanter, beroende på de aktuelle delmaterialer

k_v = flyveaskens aktivitetsfaktor med hensyn til vandtæthed.

For flyveaskebeton, som fremstilles med Aalborg Lavalkali cement eller almindelig Slite Portland cement og Asnæs flyveaske får ligning 8.10 følgende udseende:

$$\phi = \exp \left[-4.3 \left(\frac{c + 0.31 \cdot f}{v} + 4.0 \right) \right] \quad (8.20)$$

I forbindelse med de udførte forsøg er korrelationskoefficienten 0.73 for ligning (8.20).

Det fremgår af ligning 8.20, at flyveaskens forbedrende virkning på betons tæthed mod vandindtrængning bør medregnes med en faktor k_v på ca. 0.3; ikke en faktor på $k_v = 0.5$, som den danske Betonnorm foreskriver. Det må derfor konstateres, at den danske betonnorms bestemmelser er på den usikre side med hensyn til betonens vandtæthed. Det må ligeledes konstateres, at normens foreskrift om en maksimalt tilladelig vægtmæssig tilsætning på 35% flyveaske regnet i procent af den samlede vægtmængde cement + flyveaske, ikke kan begrundes ved vandtæthedsbetragtninger. Den magiske grænse på 35% flyveaske kunne ikke registreres ved denne undersøgelse.

9 SAMLET KONKLUSION AF PROJEKTET

De eksperimentelle forsøg i denne rapport's kapitel 6 har vist, at den almindelige britiske DOE-metode til proportionering af beton kan udvides til også at omfatte proportionering af flyveaskebeton.

Med hensyn til bearbejdeligheden af flyveaskebeton har det vist sig, at den velkendte reduktion af betons vandbehov ved tilsætning af flyveaske, inden for vide grænser, er helt uafhængig af, hvor stor en mængde flyveaske, der tilsættes. Vandbehovet for en flyveaskebeton kan findes på grundlag af traditionelle tabeller, idet man benytter samme procedure som ved proportionering af luftindblandet beton.

Bearbejdelighedsundersøgelsen har med andre ord vist, at Lyse's velkendte lov for betons konsistens med rimelighed kan udvides til også at omfatte flyveaskebeton inden for et meget bredt spektrum af blandinger. Lyse's udvidede lov har følgende ordlyd:

Konsistensen af friske betonblandinger, der fremstilles med samme råmaterialer, beror udelukkende på det effektive vandindhold, mens konsistensen er uafhængig af såvel cementindholdet som af flyveaskeindholdet, såfremt flyveaskeindholdet overstiger et vist minimum.

Med hensyn til styrke og styrkeudvikling af flyveaskebeton har undersøgelsen vist, at trykstyrken af flyveaskebeton kan beregnes ved hjælp af følgende udvidede Bolomey lov:

$$f_c = A \cdot \frac{c}{v} + B \cdot \frac{c}{v} + D \cdot \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E \quad (6.7)$$

hvor

- f_c = betons trykstyrke, (MPa)
- c = betonens cementindhold, (kg/m³)
- f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)
- v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)
- A, B, D, E = konstanter for givne delmaterialer og hærdetider.

Med den nye udvidede rationelle proportioneringsmetode for flyveaskebeton blev der gennemført en systematisk undersøgelse af flyveaskebetons tæthed over for kloridioner og vand under tryk.

Den systematiske undersøgelse af flyveaskebetons tæthed over for klorid, som er rapporteret i kapitel 7 har vist at:

- 1) Viden om en flyveaskebetons trykstyrke kan ikke bruges til at forudsige noget som helst om betonens modstandsdygtighed mod armeringskorrosion.
- 2) Selv på fejlfri laboratorieprøver kan der forventes variationskoefficienter på initieringstiden for armeringskorrosion på 35 procent. I forbindelse med udstøbningsfejl og inhomogeniteter i betonen, som må forventes at forekomme i praksis, kan variationskoefficienten på initieringstiden mangedobles.

- 3) De vigtigste faktorer for fremstilling af kloridtæt beton er valget af delmaterialer. Blandt delmaterialerne er cementtypen den altafgørende faktor, mens flyveasketypen og vandlagringstid udover et vist minime tidsrum er af mindre betydning.
- 4) Levetiden af konstruktionsbeton, med hensyn til diffusionskontrolleret kloridkorrosion, kan forøges væsentligt ved tilsætning af tilstrækkeligt store mængder flyveaske.
- 5) Følgende eksponentialfunktion er den bedste fundne model, som kan beskrive sammenhængen mellem de undersøgte betoners diffusionskoefficient og betonernes sammensætning.

$$D_k = \exp \left[A_2 \cdot \frac{c}{v} + B_2 \cdot \frac{f}{v} + D_2 \cdot \frac{c}{v} \cdot \frac{f}{v} + E_2 \right] \quad (7.15)$$

- hvor
- D_k = diffusionskoefficient for kloridioner, (mm²/år)
 - c = betonens cementindhold, (kg/m³)
 - f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)
 - A_2, B_2, D_2, E_2 = konstanter, hvis værdi afhænger af de benyttede delmaterialer, hærdetider og af den benyttede dimension for D_k .

Den eksperimentelle undersøgelse af flyveaskebetons tæthed over for vandindtrængning, som er rapporteret i kapitel 8 har vist at:

- 1) Vandtætheden af flyveaskebeton er tilnærmelsesvis den samme, uanset om betonen fremstilles med Slite Almindelig Portland cement eller Aalborg Lavalkali Sulfatbestandig cement.
- 2) Vandtætheden af flyveaskebeton er tilnærmelsesvis den samme, uanset om betonen vandlagres 28 eller 56 døgn, før den udsættes for hydraulisk vandtryk, selv om der sker en markant styrketilvækst i samme periode.
- 3) Betons overfladehud udgør en væsentlig barriere mod vandindtrængning, men i praksis vil vandindtrængning være bestemt af huller og udstøbningsfejl i overfladen.
- 4) Følgende eksponentialfunktion er den bedste fundne model, som kan beskrive sammenhængen mellem de undersøgte betoners vandpermeabilitet og sammensætning.

$$\phi = \exp^{-4.3 \cdot \left[\frac{c+0.31 \cdot f}{v} + 4.0 \right]} \quad (8.20)$$

- hvor
- ϕ = permeabilitetskoefficienten for vandindtrængning i beton, (m/s)
 - c = betonens cementindhold, (kg/m³)
 - f = betonens flyveaskeindhold, (kg/m³)
 - v = betonens frie vandindhold, (kg/m³)

Af holdbarhedsmæssige grunde foreskriver den danske betonnorm DS 411.84, at der højst må bruges 35 procent flyveaske til armerede betonkonstruktioner. Ingen af de eksperimentelle forsøg i denne rapport har kunnet verificere denne begrænsning. Tværtimod viser forsøgsresultaterne, at konstruktionsbeton bliver tættere overfor både klorid og vand, jo mere flyveaske der tilsættes.

Den officielle vejledning til DS 411.84 angiver også, at man ved beregning af betons vand/cement forhold kan medregne flyveaskemængden multipliceret med en aktivitetsfaktor på 0.5, uanset hvilken cement og flyveaske betonen fremstilles med. Ingen af de eksperimentelle forsøg i denne rapport har kunnet bekræfte brug af en fast værdi for aktivitetsfaktoren på 0.5. Tværtimod viser styrkeundersøgelsen, at aktivitetsfaktoren for de undersøgte flyveasker med hensyn til 28 døgns trykstyrke ligger mellem 0.15 og 0.34, afhængig af den benyttede cementtype og det aktuelle vand/cement forhold.

Tilsvarende viser vandtæthedsundersøgelsen, at flyveaskes bidrag til betonens tæthed over for vand bør medregnes med en faktor på ca. 0.3; ikke 0.5 som normen angiver.

På baggrund af de registrerede spredninger på initieringstiden for armeringskorrosion bør det desuden overvejes, om de minime dæklagstykker for beton over armeringsjern, som for tiden kræves i den danske betonnorm virkelig i praksis er tilstrækkelige til at sikre alle dele af en armeret betonkonstruktion mod armeringskorrosion.

- [1] Vitruvius: "The Ten Books on Architecture". Translated by Morris Hicky Morgan. Dover Publications, New York, 1960.
- [2] ACI Committee 116: "Cement and Concrete Terminology". ACI 116R-78. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. Detroit, Michigan 1985.
- [3] D.I.F: "Dansk Ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner". Dansk Standard DS 411. 3. udgave, Marts 1984.
- [4] Byggestyrelsen: "Basisbetonbeskrivelsen for bygningskonstruktioner". Byggestyrelsen, København, 1986.
- [5] D.I.F: Dansk Ingeniørforenings anvisning for "Anvendelse af flyveaske og mikrosilika i beton" Normstyrelsens Publikationer No. NP-188-R, 1. Udgave, April 1987.
- [6] Abdun-Nur, E.A.: "Fly Ash in Concrete - An Evaluation." Bulletin 284. Highway Research Board, Washington D.C., 1961.
- [7] Snyder, M.J.: "A Critical Review of the Technical Information on the Utilization of Fly Ash." Edison Electric Institute Report, pp 62-902, 1962.
- [8] Kokubu, M.: "Fly Ash and Fly Ash Cement." Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, Oct 7-11, 1968, Vol.IV-2 pp.75-105, 1969.
- [9] Jarriage, A.: "Les Cendres Volantes." Editions Eyrolles, Paris, 1971.
- [10] Berry, E.E. and Malhotra, V.M.: "Fly Ash for Use in Concrete, Part II - A Critical Review of the Effects of Fly Ash on the Properties of Concrete." Canmet Report 78-16, Ottawa, 1978.
- [11] Berry, E.E. and Malhotra, V.M.: "Fly Ash for Use in Concrete - A Critical Review." ACI Journal, March-April 1980.
- [12] Berry, E.E. and Malhotra, V.M.: "Fly Ash in Concrete." Publication SP 85-3, Canmet, Ottawa, Feb. 1986.

- [13] Helmuth, R.: "Fly Ash in Cement and Concrete." Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association. Skokie, Illinois, 1987.
- [14] ACI: "Use of Fly Ash in Concrete." ACI Materials Journal, Sept.-Oct. 1987, pp 381-409. ACI Committee Report 226.3R-87.
- [15] Helmuth, R.: "Water-Reducing Properties of Fly Ash in Cement Pastes, Mortars, and Concretes: Causes and Test Methods. "Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete". Malhotra, V.M. (Editor), ACI Special Publications SP91, pp 723-740, Detroit, 1986.
- [16] Smith, I.A.: "The Design of Fly Ash Concretes". Proc. Inst. Civ. Engr. 36, pp 769-790, 1967.
- [17] Bolomey, J.: "Durcissement des Mortiers et Bétons". Bulletin Technique de la Suisse Romande. 16, 22 and 24, 1927.
- [18] Ghosh, R.S.: "Proportioning Concrete Mixes Incorporating Fly Ash." Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 3, pp 68-82, Ottawa, 1976.
- [19] Rosner, J.C.: "Let's Design Fly Ash Concretes; Not Compare Them." Proceedings, Fourth International Ash Utilization Symposium, St. Louis, Missouri, Mar. 24-25, 1976.
- [20] Owens, P.L.: "Fly Ash and Its Usage in Concrete." Concrete, Vol. 13, No. 7, pp 21-26, 1979.
- [21] Hobbs, D.W.: "The Effect of Pulverized Fuel Ash Upon the Variability of Cement and Concrete Paste." Magazine of Concrete Research, Vol. 32, No. 113, pp 219-226.
- [22] Popovics, S.: "Strength Relationships for Fly Ash Concrete." ACI Journal, Vol. 79, Jan.-Feb. 1982, pp. 43-49.
- [23] Cannon, R.W.: "Proportioning Fly Ash Concrete Mixes for Strength and Economy." ACI Journal, Vol. 65, Nov 1968, pp 969-979.
- [24] Munday, J.G.L.; Ong, L.T. and Dhir, R.K.: "Mix Proportioning of Concrete with PFA: A Critical Review." Proceedings, First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Other Mineral By-Products in Concrete". Montebello,

- Canada, July 31 - August 5, 1983, Malhotra, V.M.(Editor), ACI Special Publication SP-79, pp 267-288, 1983.
- [25] Hedegård, S.E.: "Proportionering af Flyveaskebeton." Teknisk rapport nr. 143/85, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1985.
- [26] Transport and Road Research Laboratory: "Design of Concrete Mixes. Road No. 4, 2. edition. HMSO, London 1950.
- [27] Teychenne, D.C.; Franklin, R.E. and Arntroy, H.C.: "Design of Normal Concrete Mixes. Building Research Station. Department of the Environment. HMSO, Garston, 1975.
- [28] Hansen, T.C.: "Beton i henhold til DS 411-84." Teknisk rapport nr. 146/86, 2. udgave, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1986.
- [29] Narud, Henrik: "Lavstyrkebeton med flyveaske". Teknisk Rapport nr. 109/82, Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1982.
- [30] Hansen, T.C. og Hedegård, S.E.: "Proportionering af grovbeton og flyveaskebeton", Teknisk rapport nr. 168/86. Teknisk rapport nr., Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Lyngby, 1986.
- [31] Carrette, G.G. and Malhotra, V.M.: "Characterization of Canadian Fly Ashes and Their Performance in Concrete." Division Report, MRP/MSL 84-137, Canmet. Ottawa, 1984.
- [32] Pasko, T.J. and Larson, T.D.: "Some Statistical Analyses of the Strength and Durability of Fly Ash Concrete." Proceedings, ASTM, Vol. 62., 1962. pp 1054-1067.
- [33] Naik, T.R. and Ramme, B.W.: "Low Cement Content High Strength Concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 17, pp 283-294, 1987.
- [34] Gopalan, M.K. and Haque, M.N.: "Design of Fly Ash Concrete." Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp 694-702, 1985.
- [35] Owens, P.L.: "Fly Ash and Its Usage in Concrete." Concrete, Vol. 13, No. 7, pp 21-26, 1979.

- [36] Stuart, K.D.; Anderson, D.A. and Cady, P.D.: "Compressive Strength Studies on Portland Cement Mortars Containing Fly Ash and Superplasticizer." *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, pp 823-832, 1980.
- [37] Cannon, R.W.: "Proportioning Fly Ash Concrete Mixes for Strength and Economy." *ACI Journal*, Vol. 65, pp 969-979. Nov. 1968.
- [38] Dhir, R.K.; Munday, J.G.L. and Ong, L.T.: "Strength Variability of OPC/PFA Concrete." *Concrete*, June 1981, pp 33-37.
- [39] Montgomery, D.G.; Hughes, D.C. and Williams, R.I.T.: "Fly Ash in Concrete - A Microstructure Study." *Cement and Concrete Research*. Vol. 11, pp 591-603, 1981.
- [40] Sellevold, E.J.; Bager, D.H.; Jensen, E.K. and Knudsen, T.: "Silica Fume-Cement Pastes: Hydration and Pore Structure." *Proceedings, "Nordisk Mini-Seminar on Silica in Concrete"*. Cement and Concrete Research Institute, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 1981.
- [41] Minnick, L.J.; Webster, W.C. and Purdy, E.J.: "Predictions of the Effect of Fly Ash in Portland Cement Mortar and Concrete." *Journal of Materials Science*, Vol. 6, pp 163-187, 1971.
- [42] Helmuth, R.: "Some Questions Concerning ASTM Standards and Methods of Testing Fly Ash for Use with Portland Cement". *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 5, No. 2, pp 103-110. Winter, 1983.
- [43] Jensen, A.D. og Christensen, P.: "Undersøgelse og klassifikation af danske sandforekomster." *Rapportering af TR-projekt. 1. del. TI-sag nr. 88.251.1709. TR nr. 31.209-77-147. Dansk Teknologisk Institut, Tåstrup. August 1980.*
- [44] Tuutti, K.: "Corrosion of Steel in Concrete." *CBI Research Fo4:82, Stockholm 1982.*
- [45] Fagerlund, G.: "Betongkonstruktioners Beständighet. En Översikt." *Upplands Grafiska AB. Uppsala 1987.*
- [46] Hansson, C.M.: "Comments on Electrochemical Measurements of the Rate of Corrosion of Steel in Concrete." *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, pp 574-584, 1984.
- [47] Mangat, P.S. og Gurusamy, K.: "Corrosion Resistance of Steel Fibres in Concrete under Marine Exposure." *Cement and Concrete Research*, Vol. 18, pp 44-54, 1988.

- [48] Roberts, M.H.: "Effect of Calcium Chloride on the Durability of Pre-Tensioned Wire in Prestressed Concrete." Magazine of Concrete Research, Vol. 14, pp 143-154, 1962.
- [49] Arya, C.; Buenfeld, N.R. and Newman, J.B.: "Factors Influencing Chloride-Binding in Concrete." Cement and Concrete Research. Vol. 20, pp 291-300, 1990.
- [50] Ramachandran, V.S.; Seeley, R.C. and Polomark, G.M.: "Free and Combined Chloride in Hydrating Cement and Cement Compounds." Materials and Structures, RILEM, Vol. 17, No. 100, pp 285-289, 1984.
- [51] Strunge, H.: "Flyveaskens Indvirkning på Porøsitet og Chloridbinding i Cementpasta." Eksamensprojekt, Kemiafdelingen, Danmarks Ingeniørakademi, Lyngby, 1986.
- [52] Tuutti, K.: "Analysis of Pore Solution Squeezed out of Cement Paste and Mortar." Nordisk Concrete Research, Publ. No. 1, 1982.
- [53] Schiessl, P. (Editor): "Corrosion of Steel in Concrete." Report of Technical Committee 60-CSC, RILEM, 1988.
- [54] Diamond, S.: "Effects of Two Danish Fly Ashes on Alkali Contents of Pore Solutions of Cement-Fly Ash Pastes." Cement and Concrete Research, Vol. 11, pp 383-394, 1981.
- [55] Preece, C.M.; Grønvold, F.O. and Frølund, T.: "The Influence of Cement Type on the Electro-Chemical Behaviour of Steel in Concrete." Chapter 23, pp 393-405, in "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction." A.P. Crane (Editor), Ellis Harwood Ltd., Chichester, 1983.
- [56] Crank, J.: "The Mathematics of Diffusion." Second Edition, Clarendon Press, Oxford, 1975.
- [57] Hartl, G. and Lukas, W.: "Investigations on the Penetration of Concrete and on the Effect of Cracks on Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement." Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 7, pp 497-506, 1987.
- [58] Smolczyk, H.G.: "State of Knowledge on Chloride Diffusion in Concrete." Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 12, pp 837-843, 1984.
- [59] Coleparidi, M.; Marcialis, A. and Turriziani, R.: "La Cinetica di Penetrazione Degli Ioni Cloruro nel Calcestruzzo." Il Cemento, Vol. 67, pp 157-164, 1970.

- [60] Hansson, C.M.; Frølund, Th. and Markussen, J.B.: "The Effect of Chloride Cation Type on the Corrosion of Steel in Concrete by Chloride Salts." *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, pp 65-73, 1985.
- [61] Page, C.L.; Smith, N.R. and Taras, A.El.: "Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes." *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, pp 395-406, 1981.
- [62] Goto, S. and Roy, D.: "Diffusion of Ions Through Hardened Cement Pastes." *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, pp 751-757, 1981.
- [63] Hansson, C.M.; Strunge, H.; Markussen, J.B. and Frølund, T.: "The Effect of Cement Type on the Diffusion of Chloride." *Nordisk Concrete Research*, Publication No 4, pp 70-80, 1985.
- [64] Page, C.L.; Short, N.R. and Holden, W.R.: "The Influence of Different Cements on Chloride Induced Corrosion of Reinforcing Steel." *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, pp 79-86, 1986.
- [65] Byfors, K.: "Influence of Silica Fume and Fly Ash on Chloride Diffusion and pH Values in Cement Paste." *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, pp 115-130, 1987.
- [66] Li, S. and Roy, D.M.: "Investigation of Relations between Porosity, Pore Structure, and Cl-Diffusion of Fly Ash and Blended Cement Pastes." *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, pp 749-759, 1986.
- [67] Hansen, T.C.; Jensen, H. and Johannesson, T.: "Chloride Diffusion and Corrosion Initiation of Steel Reinforcement in Fly Ash Concretes". *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, pp 782-784, 1986.
- [68] Page, C.L.: "Corrosion of Steel in Concrete." *Noter til et undervisningsmodul ved Aston University*, 1987.
- [69] Holden, W.R.; Page, C.L. and Short, N.R.: "The Influence of Chlorides and Sulphates on Durability." *Proceedings, Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*. A.P. Crane (Editor), Chapter 9, pp 143-150, London 1983.
- [70] Powers, T.C.; Copeland, L.E.; Hayes, J.C. and Mann, H.M.: "Permeability of Portland Cement Paste." *Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Research Department, Bulletin 53*, Chicago, April 1955.

- [71] Powers, T.C.; Mann, H.M. and Copeland, L.E.: "The Flow of Water in Hardened Portland Cement Paste." Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Research Department, Bulletin 106, Chicago, July 1959.
- [72] Powers, T.C.: "The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete." Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Research Department, Bulletin 106, Chicago, July 1959.
- [73] Powers, T.C.; Copeland, L.E. and Mann, H.M.: "Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Pastes." Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Research Department, Bulletin 110, Chicago. May, 1959.
- [74] Walz, K.: "Undurchlässiger Beton." Bautechnik-Archiv, Heft 13, Berlin 1956.
- [75] Graf, H. und Grube, H.: "Verfahren für Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser." Beton 5/86, pp 184-226, 1986.
- [76] Nischer, P.: "Improving the Durability of Structures - Concrete - Technological Influencing Factors". Betonwerk + Fertigteil - Technik, Heft 5/1987, pp 341-351.
- [77] Dhir, R.K.; Munday, J.G.L.; Ho, N.Y. and Tham, K.W.: "Pfa in Structural Precast Concrete: Measurement of Permeability." Concrete, December, 1986, pp. 4-8.
- [78] Szilard, R. and Wallevik, O.: "Effectiveness of Concrete Cover in Corrosion Protection of Prestressing Steel" in "Corrosion of Metals in Concrete", ACI Special Publication, SP 49-5, pp 47-68, 1975.
- [79] Poon, C.S.; Clark, A.I.; Perry, R.; Barker, A.P. and Barnes, P.: "Permeability Study of the Cement Based Solidification. Process for the Disposal of Hazardous Wastes." Cement and Concrete Research. Vol. 16, pp 161-172, 1986.
- [80] Edmeades, R.M. and Hewlett, P.C.: "Waterproofing Admixtures for Concrete". Concrete, August, pp 31-32, 1985.
- [81] Nyame, B.K.: "Permeability of Normal and Lightweight Mortars." Magazine of Concrete Research, Vol. 37, No 130, March, 1985.

- [82] Manmohan, D. and Mehta, P.K.: "Influence of Pozzolanic, Slag and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes." *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 3, No. 1, pp 63-67, 1981.
- [83] Goto, S.; Roy, D.M.: "The Effect of W/C-ratio and Curing Temperature on the Permeability of Hardened Cement Paste." *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, pp 575-579, 1981.
- [84] Marsh, B.K.; Day, R.L. and Bonner, D.G.: "Pore Structure Characteristics Affecting the Permeability of Cement Paste Containing Fly Ash." *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, pp 1027-1038, 1985.
- [85] Hughes, D.C.: "Pore Structure and Permeability of Hardened Cement Paste." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, No. 133, pp 227-233, 1985.
- [86] Zagar, L.: "Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Baustoffen." *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 26, (1955) H.12, pp 777/782.
- [87] Mehta, K.: "Pozzolanic and Cementitious By-Products as Mineral Admixtures for Concrete - A Critical Review." *Proceedings, "First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete"*. Montebello, Canada, July 31-August 5, 1983, Malhotra, V.M. (Editor), ACI Special Publication SP-79, pp 1-46, 1983.
- [88] Bager, D.: "Effect of Curing on the Pore Structure and Permeability of Cement-Fly-Ash Mortars." *Teknisk rapport nr. 139/84, Laboratoriet for Bygningmateriaaler, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby*, 1984.
- [89] Murata, J.: "Studies on the Permeability of Concrete." *RILEM Bulletin*, No. 29, pp 47-54, December, 1965.
- [90] Andersson, C. og Petersson, P.E.: "Härdningens Invärkan på Betongs Permeabilitet och Beständighet." *Statens Provningsanstalt, Teknisk rapport 1887:07, Borås*, 1987.
- [91] Møller, L.E.: "Tæthed af flyveaskebeton - overfladeproblematik." *Eksamensprojekt, Laboratoriet for Bygningmateriaaler, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby*, 1985.
- [92] Freund, R.J. and Littell, R.C.: "SAS for Linear Models." *A Guide to the Anova and GLM Procedures. SAS series in statistical applications*, edited by Ray, A.A.

- [93] SAS Institute SAS User Guide: Basic, Version 5 Edition, Cary, North Carolina, USA, 1985.
- SAS User Guide: Statistics, Version 5 Edition, Cary, North Carolina, USA, 1985.
- SAS/Graph User Guide, Version 5 Edition, Cary, North Carolina, USA, 1985.
- [94] Sall, J.: "SAS Regression Applications." SAS Institute Technical Report A-102, Cary, North Carolina. Revised August 7, 1981.
- [95] Bang, A.E.: "Elementær Hydraulik." Teknisk forlag, 1. udgave, 7. oplag, København, 1987.
- [96] Mouritzen, J.: "Flyveaske til cement - og betonindustrien." Nordisk Beton, Nr. 2, pp 27-36, 1980.
- [97] Fontana, M.G. and Greene, N.D.: "Corrosion Engineering." McGraw-Hill. Series in Materials Science and Engineering. 1967.
- [98] Mattsson, Einar: "Elektrokemi och Korrosionslära." Korrosionsinstitutet, Stockholm, Bulletin Nr. 56, 1984.
- [99] Bakker, R.F.M.: "Permeability of Blended Cement Concretes." Proceedings "First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag and Other Mineral By-Products in Concrete". Montebello, Canada, July 31-August 5, 1983, Malhotra, V.M. (Editor), ACI Special Publication SP-79, pp 589-606, 1983.
- [100] Malhotra, V.M. (Editor): "Supplementary Cementing Materials for Concrete." Chapter 2, pp 37-167.: "Fly Ash in Concrete." by Berry, E.E. and Malhotra, V.M., Canmet, Ottawa, 1986.
- [101] DIN 1048:% "Wasserundurchlässigkeit von Festbeton". DIN 1048, Blatt 2 Januar 1972. Described in detail in Zimmer I.K.: "Handbuch der Betonprüfung - Anleitung und Beispiele". Beton Verlag, GMBH, Düsseldorf, 1977.

11 SYMBOLFORTEGNELSE

A_i, B_i, D_i, E_i	Konstanter, som er afhængig af cementtype, flyveasketype og betonens lagringsforhold.
c	Betonens cementindhold, (kg/m ³).
C	Kloridkoncentration, (g/mm ² •år).
$C_{(x,t)}$	Kloridkoncentration i afstand x fra betons overflade til tiden t , (g/mm ² •år).
C_s	Kloridkoncentration på betons overflade, (g/mm ² •år).
C_o	Oprindelige kloridkoncentration i beton, (g/mm ² •år).
d	Diameter, (m).
d_c	Densitet af cement, (kg/m ³).
d_f	Densitet af flyveaske, (kg/m ³).
d_v	Væskens densitet, (kg/m ³).
D_k	Diffusionskoefficient for kloridioner, (mm ² /år).
E_0	Ligevægtpotentialet, (mVolt).
E_1	Jernets potentiale, (mVolt).
E_{kor}	Jernets korrosionspotentiale, (mVolt).
f	Betonens flyveaskeindhold, (kg/m ³).
f_{aktiv}	Aktivt styrkebidrag fra flyveaske til betons trykstyrke, på grund af flyveaskes reaktion med den calciumhydroxyd, der dannes under cementens hydratisering, (MPa).
f_{alm}	Trykstyrke af beton, som fremstilles uden flyveaske, (MPa).
f_c	Betons trykstyrke, (MPa).
$f_{c,slite}$	Trykstyrke af beton, som fremstilles med Slite Portland cement, (MPa).
$f_{c,laval}$	Trykstyrke af beton, som fremstilles med Lavalkali Portland cement, (MPa).
$f_{c,hvid}$	Trykstyrke af beton, som fremstilles med Hvid Portland cement, (MPa).
f_{passiv}	Passivt styrkebidrag til betons trykstyrke, alene på grund af flyveaskens fysiske tilstedeværelse, (MPa).
G	Tyngdeacceleration, (m/s ²).

g_k	Kloridflux. (d.v.s. mængden af kloridioner, der passerer et enhedsareal per tidsenhed), (g/mm ² •år).
Δh	Trykniveaufald, (m).
i_o	Udvekslingsstrømtæthed, (µAmp).
i_{app}	Den strømstyrke som potentiostaten yder, (µAmp).
i_{kor}	Korrosionshastighed af armeringsjern, (µAmp).
k_v	Aktivitetsfaktor for flyveaske med hensyn til vandtæthed.
k_d	Aktivitetsfaktor for flyveaske med hensyn til kloridiondiffusion.
k_s	Aktivitetsfaktor for flyveaske med hensyn til styrke.
L	Længde, (m)
p_i	Tryk, (N/m ²).
Δp	Trykforskel, (N/m ²).
P	Vandreduktion ved tilsætning af flyveaske til beton, (%).
Q	Massestrøm, (m ³ /s).
Q'	Gennemstrømmende masse per arealenhed og tidsenhed, (kg/m ² •s).
r	Radius, (m).
t	Tid, (år eller sekund).
T	Betonens indhold af tilslag, (kg/m ³).
v	Betonens frie vandindhold, (kg/m ³).
V	Middelstrømningshastighed, (m/s).
x	Længde eller stedkoordinaten, (m eller mm).
x_{max}	Den dybde i betonen, hvor koncentrationen af klorid er faldet 5 promille i forhold til kloridkoncentrationen ved prøvelegemets overflade, (mm).
$x_{max,v}$	Indtrængningsdybde for vand i beton, (m).
α	Nedre vand/cement-tals grænse for fremstilling af beton med de aktuelle delmaterialer og med normal kohæsion uden tilsætning af plastificeringsstof.
B	Øvre vand/cement-tals grænse for fremstilling af beton med de aktuelle materialer og med normal kohæsion uden tilsætning af fortykningsstof.
Γ	Formfaktor, som tager højde for flyveaskepartiklernes afrundede form i forhold til cementpartiklernes kantede form.

η	Dynamisk viskositet, (N•s/m ²).
λ	Kinetisk viskositet (m ² /s).
Φ	Specifik permeabilitetskoefficient, (m ²).
ϕ	Permeabilitetskoefficient, (m/s).

12. TABELLER

Miljøklasse	Max. værdi af v/c	Min.værdi af f_{ck}
Aggressiv	0.50	30 MN/m ²
Moderat	0.60	25 -
Passiv	intet krav	15 -

Tabel 4.1 Den danske betonnorms (DS 411.84) krav til maksimalt tilladelige værdier for vand-cement forhold og mindste tilladelige værdier for karakteristisk trykstyrke for beton i forskellige miljøklasser.

		Intervaller for sammensætning	Typisk sammensætning	Alternativ sammensætning
SiO ₂	(%)	40-55	50	ca. 65
Al ₂ O ₃	(%)	20-30	25	ca. 25
Fe ₂ O ₃	(%)	5-10	8	ca. 3
CaO	(%)	3- 7	6	ca. 3
MgO	(%)	1- 4	3	ca. 1
SO ₃	(%)	0.4- 2	1	ca.0.4
K ₂ O + Na ₂ O	(%)	1- 5	3	ca. 2

Den alternative sammensætning forekommer specielt for australske og nogle typer canadisk kul.

Tabel 5.1 Den kemiske sammensætning af flyveasker fra danske kraftværker givet efter [96].

Tilslag		Sætmål			
d _{max}	type	0- 30 mm	30- 60 mm	60- 100 mm	100- 150 mm
8- 10 mm	sømaterialer bakkematerialer skærver (knust)	160	180	190	200
		180	210	220	230
16- 20 mm	sømaterialer bakkematerialer skærver (knust)	148	165	175	183
		152	170	180	188
		172	192	204	213
32- 40 mm	sømaterialer bakkematerialer skærver (knust)	137	153	162	169
		141	158	167	175
		160	178	189	197
64- 76 mm	sømaterialer bakkematerialer skærver (knust)	131	146	154	161
		135	151	160	167
		152	170	180	188

Tabel 6.1 Vandbehov i liter pr. m³ beton. Tabelværdierne gælder for beton uden luftindblanding. Vandbehovet angiver det frie vand i den friskblandede beton, d.v.s. det indbefatter evt. frit vand i tilslaget, men ikke absorberet (bundet) vand i tilslaget (fra ref. 28).

<u>ANALYSERESULTATER</u> <u>for</u>		<u>ASNÆS</u>	<u>THY</u>
SiO ₂	%	54.92	63.58
Al ₂ O ₃	%	30.26	21.18
Fe ₂ O ₃	%	5.55	6.31
CaO	%	3.24	2.81
MgO	%	1.17	1.42
SO ₃	%	0.22	0.51
Glødetab	%	2.23	2.75
Sum	%	97.18	98.51
TiO ₂	%	1.36	0.88
<u>Total alkali</u>			
K ₂ O	%	1.45	2.00
Na ₂ O	%	0.37	0.70
Na ₂ O _{ækv.}	%	1.32	2.02
<u>Vandopl. alkali</u>			
K ₂ O	%	0.35	0.56
Na ₂ O	%	0.09	0.18
Na ₂ O _{ækv.}	%	0.32	0.55

Tabel 6.2 De i undersøgelsen benyttede flyveaskers sammensætning, som bestemt ved CTO i Aalborg.

<u>ANALYSERESULTATER</u> for		<u>LAVALKALI</u> <u>CEMENT</u>	<u>SLITE</u> <u>CEMENT</u>	<u>HVID</u> <u>CEMENT</u>
SiO ₂	‡	24.43	19.84	24.25
Al ₂ O ₃	‡	2.33	2.08	1.78
Fe ₂ O ₃	‡	2.88	2.08	0.33
CaO	‡	66.00	63.47	68.37
MgO	‡	0.63	3.00	0.52
SO ₃	‡	2.08	2.88	2.05
Glødetab	‡	0.80	2.42	1.86
Sum	‡	99.15	97.74	99.26
<u>Total alkali</u>				
K ₂ O	‡	0.18	1.25	0.03
Na ₂ O	‡	0.16	0.21	0.09
Na ₂ O _{ekv.}	‡	0.28	1.03	0.11
<u>Vandopl. alkali</u>				
K ₂ O	‡	0.04	1.10	0.008
Na ₂ O	‡	0.02	0.13	0.023
Na ₂ O _{ekv.}	‡	0.05	0.85	0.028

Tabel 6.3 De i undersøgelsen benyttede cements kemiske sammensætning, som bestemt ved CTO i Aalborg.

----- CEMENT-LAVAL (REFERENCEBLANDINGERASKE) -----

BLANDING		CEMENT	ASKE	VAND	SAND	STEN	TILSETN
C/V	F/V	kg	kg	kg	kg	kg	%
1.0	0.0	200	0	200	863	1054	0.0
1.4	0.0	273	0	195	744	1156	0.0
1.8	0.0	351	0	195	690	1126	0.0
2.2	0.0	429	0	195	625	1112	0.0
2.6	0.0	507	0	195	585	1086	2.3

SERIE 1 ----- CEMENT-LAVAL ASKE-ASN -----

BLANDING		CEMENT	ASKE	VAND	SAND	STEN	TILSETN
C/V	F/V	kg	kg	kg	kg	kg	%
0.2	1.6	34	275	172	630	1169	0.0
0.2	2.0	36	360	180	574	1113	4.2
0.6	0.8	105	140	175	720	1174	0.0
0.6	1.2	108	216	180	648	1152	0.0
0.6	1.6	108	288	180	582	1131	0.0
0.6	2.0	108	360	180	543	1083	3.9
1.0	0.4	180	72	180	741	1159	0.0
1.0	0.8	180	144	180	657	1169	0.0
1.0	1.2	180	216	180	578	1137	0.0
1.0	1.6	180	288	180	557	1082	2.8
1.0	2.0	180	360	180	517	1049	6.6
1.4	0.4	252	72	180	685	1167	0.0
1.4	0.8	252	144	180	613	1139	0.0
1.4	1.2	252	216	180	566	1099	3.2
1.4	1.6	252	288	180	525	1066	7.0
1.4	2.0	252	360	180	477	1014	12.1
1.8	0.4	324	72	180	645	1147	0.0
1.8	0.8	324	144	180	575	1116	2.0
1.8	1.2	324	216	180	534	1084	7.4
1.8	1.6	324	288	180	476	1035	11.5
2.2	0.4	396	72	180	601	1117	3.0
2.2	0.8	396	144	180	559	1085	5.4

SERIE 2 ----- CEMENT-LAVAL ASKE-THY -----

BLANDING		CEMENT	ASKE	VAND	SAND	STEN	TILSETN
C/V	F/V	kg	kg	kg	kg	kg	%
0.2	1.6	35	280	175	611	1170	0.0
0.2	2.0	35	350	175	561	1138	0.0
0.6	0.8	108	144	180	694	1172	0.0
0.6	1.2	105	210	175	628	1176	0.0
0.6	1.6	108	288	180	565	1132	0.0
0.6	2.0	108	360	180	523	1091	3.3
1.0	0.4	180	72	180	724	1167	0.0
1.0	0.8	180	144	180	639	1167	0.0
1.0	1.2	180	216	180	580	1146	0.0
1.0	1.6	180	288	180	534	1104	2.0
1.0	2.0	180	360	180	496	1059	5.0
1.4	0.4	252	72	180	659	1172	0.0
1.4	0.8	245	140	175	604	1167	0.0
1.4	1.2	245	210	175	556	1133	3.0
1.4	1.6	252	288	180	505	1074	5.0
1.4	2.0	252	360	180	470	1026	7.9
1.8	0.4	324	72	180	613	1159	0.0
1.8	0.8	324	144	180	560	1127	1.5
1.8	1.2	324	216	180	518	1086	4.4
1.8	1.6	324	288	180	478	1035	12.0
2.2	0.4	396	72	180	575	1137	3.0
2.2	0.8	396	144	180	529	1099	4.0

Tabel 6.4

Blanderecepter per m³ beton med tilslag i ssd tilstand for betoner til undersøgelse af bearbejdelighed, styrke og kloridindtrængning.

----- CEMENT-SLITE (REFERENCEBLANDINGER) -----

BLANDING		CEMENT	ASKE	VAND	SAND	STEN	TILSETN
C/V	F/V	kg	kg	kg	kg	kg	%
1.0	0.0	200	0	200	846	1060	0.0
1.4	0.0	273	0	195	732	1116	0.0
1.8	0.0	351	0	195	670	1147	0.0
2.2	0.0	425	0	193	607	1122	0.0
2.6	0.0	507	0	195	565	1096	0.0

SERIE 3 ----- CEMENT-SLITE ASKE-ASN -----

BLANDING		CEMENT	ASKE	VAND	SAND	STEN	TILSETN
C/V	F/V	kg	kg	kg	kg	kg	%
0.2	1.6	35	282	176	606	1160	4.2
0.2	2.0	36	360	180	547	1115	3.4
0.6	0.8	106	141	176	696	1180	0.0
0.6	1.2	106	211	176	624	1168	0.0
0.6	1.6	108	288	180	562	1126	3.2
0.6	2.0	106	352	176	524	1099	7.3
1.0	0.4	180	72	180	721	1166	0.0
1.0	0.8	176	141	176	650	1191	0.0
1.0	1.2	180	216	180	577	1136	0.0
1.0	1.6	180	288	180	531	1097	4.5
1.0	2.0	180	360	180	490	1052	7.1
1.4	0.4	246	70	176	660	1174	0.0
1.4	0.8	252	144	180	593	1147	0.0
1.4	1.2	252	216	180	544	1110	3.6
1.4	1.6	246	282	176	509	1082	7.9
1.4	2.0	252	360	180	465	1017	11.7
1.8	0.4	324	72	180	611	1155	2.5
1.8	0.8	324	144	180	558	1122	4.4
1.8	1.2	317	211	176	520	1096	6.9
1.8	1.6	317	282	176	484	1048	13.3
2.2	0.4	396	72	180	572	1135	5.6
2.2	0.8	387	141	176	534	1108	7.3

SERIE 4 ----- CEMENT-SLITE ASKE-THY -----

BLANDING		CEMENT	ASKE	VAND	SAND	STEN	TILSETN
C/V	F/V	kg	kg	kg	kg	kg	%
0.2	1.6	34	270	169	621	1189	0.0
0.2	2.0	33	330	165	579	1170	0.0
0.6	0.8	108	144	180	696	1169	0.0
0.6	1.2	106	211	176	628	1171	0.0
0.6	1.6	106	282	176	573	1143	1.3
0.6	2.0	106	352	176	679	1416	6.3
1.0	0.4	176	70	176	725	1169	0.0
1.0	0.8	176	141	176	645	1177	0.0
1.0	1.2	180	216	180	582	1139	0.0
1.0	1.6	176	282	176	542	1116	2.0
1.0	2.0	176	352	176	503	1073	4.4
1.4	0.4	252	72	180	658	1170	0.0
1.4	0.8	246	141	176	603	1160	0.0
1.4	1.2	246	211	176	553	1128	2.8
1.4	1.6	246	282	176	513	1086	5.1
1.4	2.0	246	352	176	478	1040	7.4
1.8	0.4	317	70	176	618	1168	1.4
1.8	0.8	317	141	176	563	1133	4.4
1.8	1.2	317	211	176	524	1099	6.1
1.8	1.6	317	282	176	487	1054	11.1
2.2	0.4	387	70	176	581	1147	4.7
2.2	0.8	387	141	176	535	1111	4.4

Tabel 6.4 Blanderecepter fortsat.

		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
F/V FORHOLD								
2.0	VAND (kg)	180	180	180	180			
	PLAST (t)	0.42	0.39	0.66	1.15			
	SETHÅL (mm)	140	80	120	130			
	LUFT (t)	1.50	2.10	2.00	1.50			
	DENSITET	2254	2237	2243	2297			
1.6	VAND (kg)	172	180	180	180	180		
	PLAST (t)	0.00	0.00	0.28	0.70	1.18		
	SETHÅL (mm)	45	60	65	90	95		
	LUFT (t)	1.70	1.70	2.00	2.00	2.00		
	DENSITET	2277	2268	2274	2271	2320		
1.2	VAND (kg)		180	180	180	180		
	PLAST (t)		0.00	0.00	0.32	0.68		
	SETHÅL (mm)		70	60	60	90		
	LUFT (t)		1.40	1.50	2.00	1.60		
	DENSITET			2298	2300	2310		
0.8	VAND (kg)		175	180	180	180	180	
	PLAST (t)		0.00	0.00	0.00	0.20	0.54	
	SETHÅL (mm)		40	65	60	65	100	
	LUFT (t)		1.40	1.50	1.40	1.80	1.50	
	DENSITET		2318	2305	2322	2337	2338	
0.4	VAND (kg)			180	180	180	180	
	PLAST (t)			0.00	0.00	0.00	0.30	
	SETHÅL (mm)			40	60	55	60	
	LUFT (t)			1.60	1.40	1.50	1.80	
	DENSITET			2331	2348	2362	2368	
0.0	VAND (kg)			200	195	195	195	195
	PLAST (t)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.23
	SETHÅL (mm)			50	75	120	85	80
	LUFT (t)			1.60	1.60	1.30	1.40	1.70
	DENSITET			2325	2325	2354	2368	2375

Tabel 6.5a De friske betoners egenskaber for serie 1 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE

		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
F/V FORHOLD								
2.0	VAND (kg)	175	180	180	180			
	PLAST (t)	0.00	0.33	0.50	0.79			
	SETHÅL (mm)	130	110	100	100			
	LUFT (t)	1.60	1.60	1.80	2.10			
	DENSITET	2320	2311	2303	2300			
1.6	VAND (kg)	175	180	180	180	180		
	PLAST (t)	0.00	0.00	0.20	0.50	1.20		
	SETHÅL (mm)	145	100	100	105	170		
	LUFT (t)	1.20	1.40	1.40	1.30	1.90		
	DENSITET		2322	2317	2339	2320		
1.2	VAND (kg)		175	180	175	180		
	PLAST (t)		0.00	0.00	0.30	0.44		
	SETHÅL (mm)		95	90	90	95		
	LUFT (t)		1.50	1.00	1.20	1.70		
	DENSITET		2344	2339	2362	2334		
0.8	VAND (kg)		180	180	175	180	180	
	PLAST (t)		0.00	0.00	0.00	0.15	0.40	
	SETHÅL (mm)		120	95	85	80	50	
	LUFT (t)		1.40	1.20	1.40	1.40	1.20	
	DENSITET		2345	2354	2359	2345	2379	
0.4	VAND (kg)			180	180	180	180	
	PLAST (t)			0.00	0.00	0.00	0.30	
	SETHÅL (mm)			70	60	60	65	
	LUFT (t)			1.50	1.10	1.50	1.50	
	DENSITET			2339	2372	2376	2368	
0.0	VAND (kg)			200	195	195	195	195
	PLAST (t)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.23
	SETHÅL (mm)			50	75	120	85	80
	LUFT (t)			1.60	1.60	1.30	1.40	1.70
	DENSITET			2325	2325	2354	2368	2375

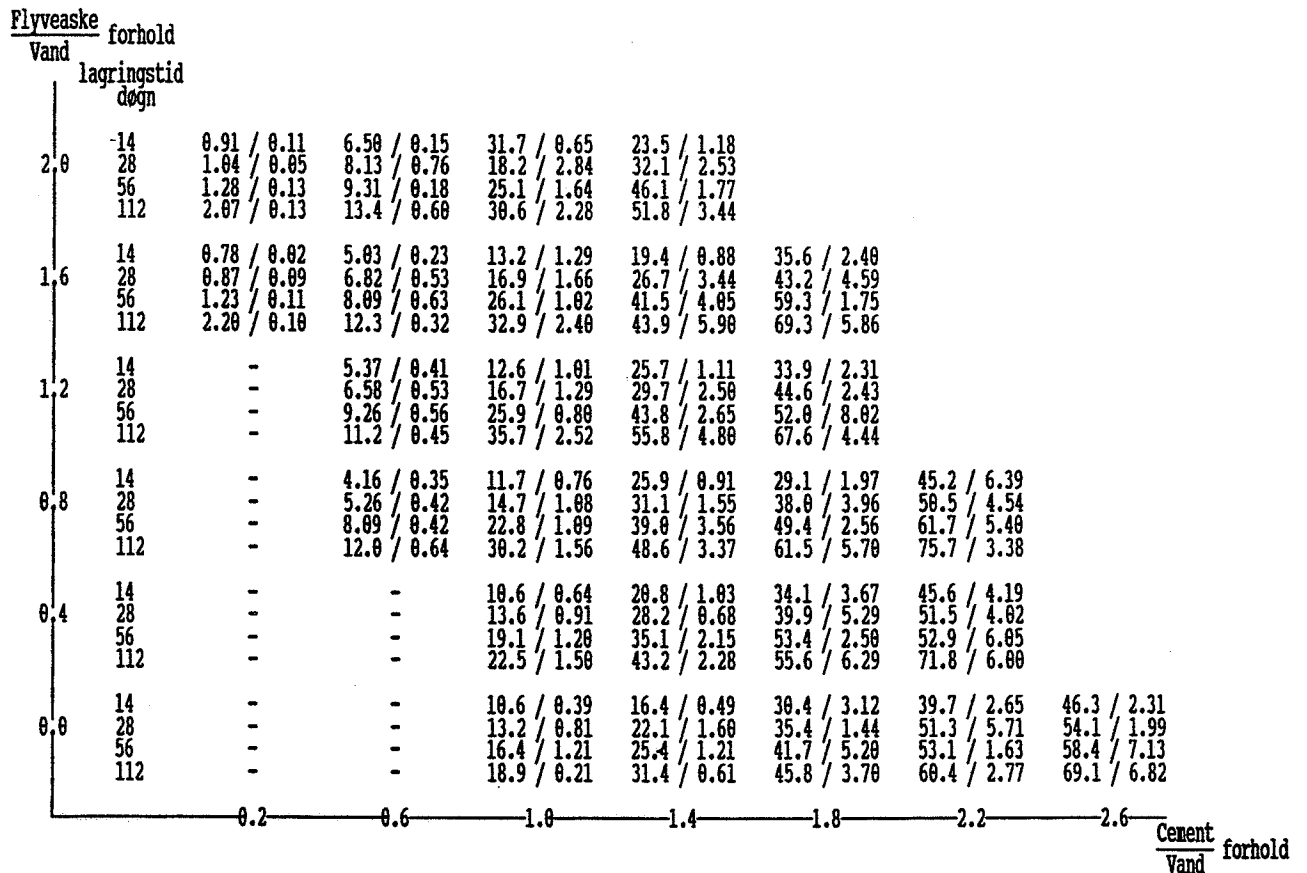
Tabel 6.5b De friske betoners egenskaber for serie 2 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG THY FLYVEASKE

		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
F/V FORHOLD								
2.0	VAND (kg)	180	176	180	180			
	PLAST (t)	0.34	0.73	0.71	1.17			
	SETHÅL(mm)	90	100	130	70			
	LUFT (t)	1.90	2.40	2.30	3.80			
	DENSITET	2240	2226	2249	2223			
1.6	VAND (kg)	176	180	180	176	176		
	PLAST (t)	0.42	0.32	0.45	0.79	1.33		
	SETHÅL(mm)	160	110	70	90	100		
	LUFT (t)	2.20	1.70	2.20	1.80	2.20		
	DENSITET	2268	2280	2257	2294	2277		
1.2	VAND (kg)		176	180	180	176		
	PLAST (t)		0.00	0.00	0.36	0.69		
	SETHÅL(mm)		60	70	80	100		
	LUFT (t)		2.00	1.90	2.20	1.80		
	DENSITET		2303	2362	2300	2300		
0.8	VAND (kg)		176	176	180	180	176	
	PLAST (t)		0.00	0.00	0.00	0.44	0.73	
	SETHÅL(mm)		70	40	80	80	95	
	LUFT (t)		1.60	1.30	1.80	2.20	1.60	
	DENSITET		2320	2354	2308	2331	2325	
0.4	VAND (kg)			180	176	180	180	
	PLAST (t)			0.00	0.00	0.25	0.56	
	SETHÅL(mm)			55	60	80	85	
	LUFT (t)			1.40	1.50	1.80	2.40	
	DENSITET			2325	2354	2365	2351	
0.0	VAND (kg)			200	195	195	193	195
	PLAST (t)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SETHÅL(mm)			60	100	90	80	50
	LUFT (t)			4.20	3.40	2.40	2.50	1.40
	DENSITET			2257	2297	2320	2347	2351

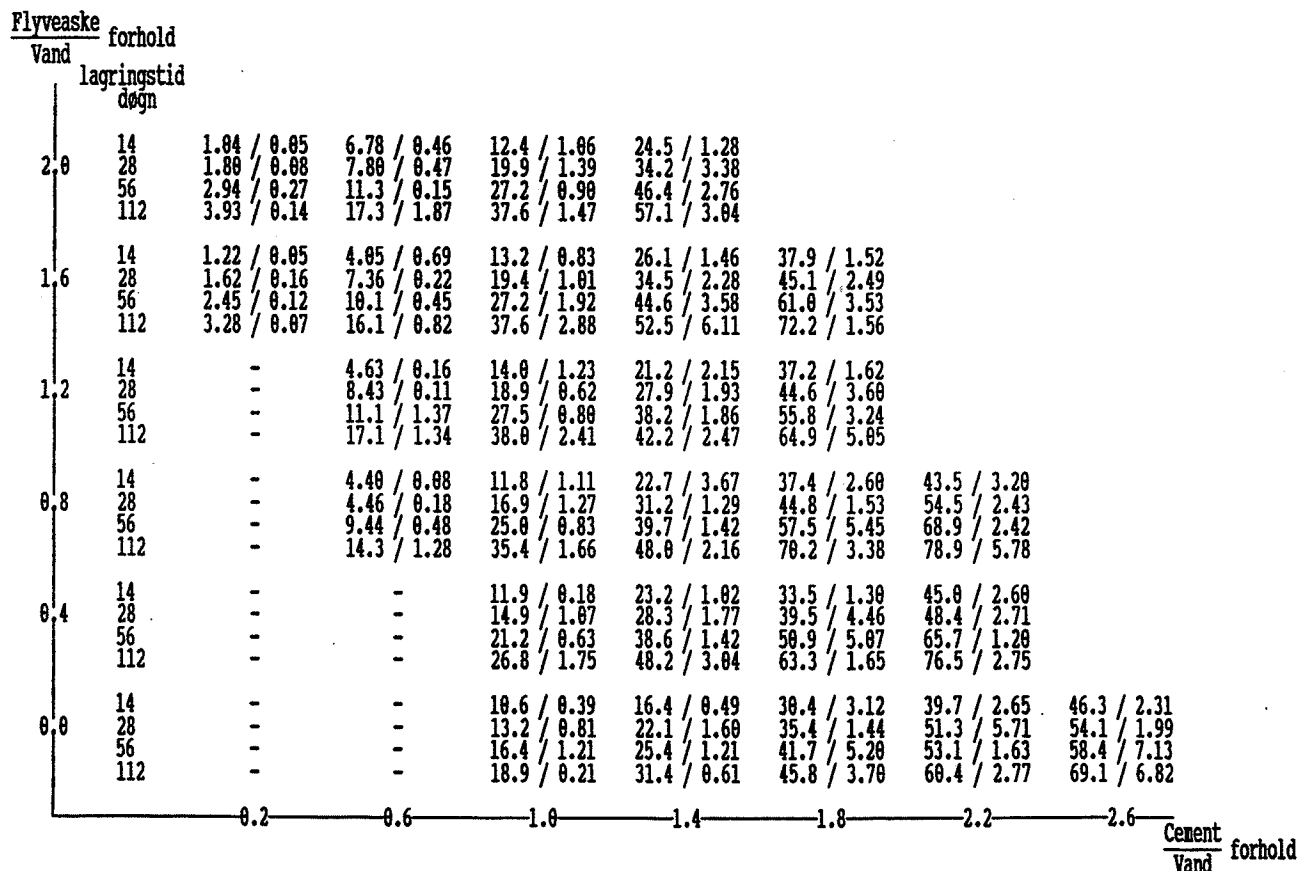
Tabel 6.5c De friske betoners egenskaber for serie 3 fremstillet med SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE

		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
F/V FORHOLD								
2.0	VAND (kg)	165	176	176	176			
	PLAST (t)	0.00	0.63	0.44	0.74			
	SETHÅL(mm)	90	80	95	130			
	LUFT (t)	1.50	1.40	1.50	1.40			
	DENSITET	2317	2325	2288	2308			
1.6	VAND (kg)	169	176	176	176	176		
	PLAST (t)	0.00	0.13	0.20	0.51	1.11		
	SETHÅL(mm)	135	105	80	110	180		
	LUFT (t)	1.60	1.50	1.40	1.40	1.20		
	DENSITET	2314	2317	2314	2308	2362		
1.2	VAND (kg)		176	180	176	176		
	PLAST (t)		0.00	0.00	0.28	0.61		
	SETHÅL(mm)		90	120	105	95		
	LUFT (t)		1.50	1.30	1.20	1.50		
	DENSITET		2320	2342	2337	2322		
0.8	VAND (kg)		180	176	176	176	176	
	PLAST (t)		0.00	0.00	0.00	0.44	0.44	
	SETHÅL(mm)		105	95	90	100	80	
	LUFT (t)		1.40	1.60	1.50	1.30	1.30	
	DENSITET		2334	2290	2308	2345	2331	
0.4	VAND (kg)			176	180	176	176	
	PLAST (t)			0.00	0.00	0.14	0.47	
	SETHÅL(mm)			30	80	85	110	
	LUFT (t)			1.40	1.30	1.20	1.40	
	DENSITET			2345	2342	2357	2348	
0.0	VAND (kg)			200	195	195	193	195
	PLAST (t)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SETHÅL(mm)			60	100	90	80	50
	LUFT (t)			4.20	3.40	2.40	2.50	1.40
	DENSITET			2257	2297	2320	2347	2351

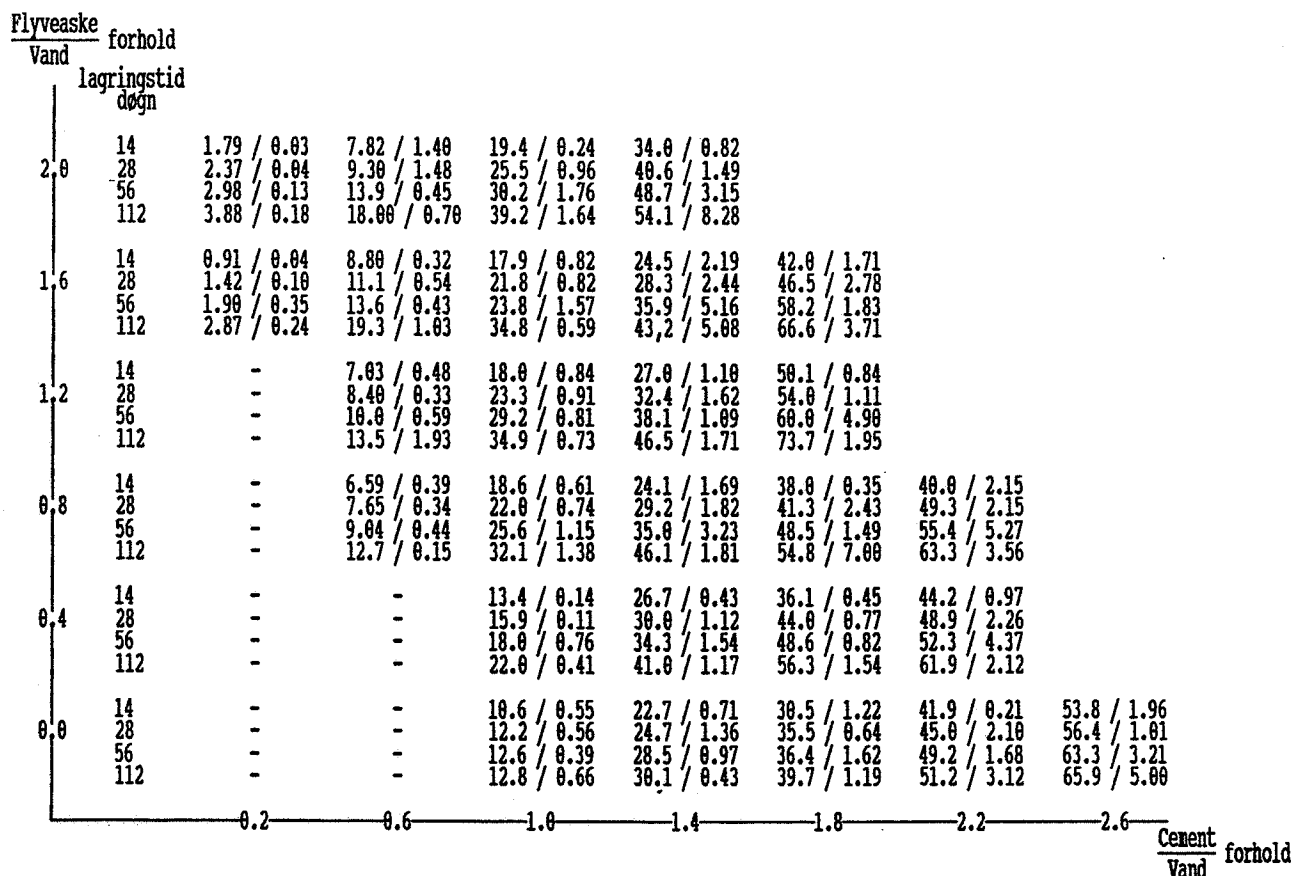
Tabel 6.5d De friske betoners egenskaber for serie 4 fremstillet med SLITE CEMENT OG THY FLYVEASKE



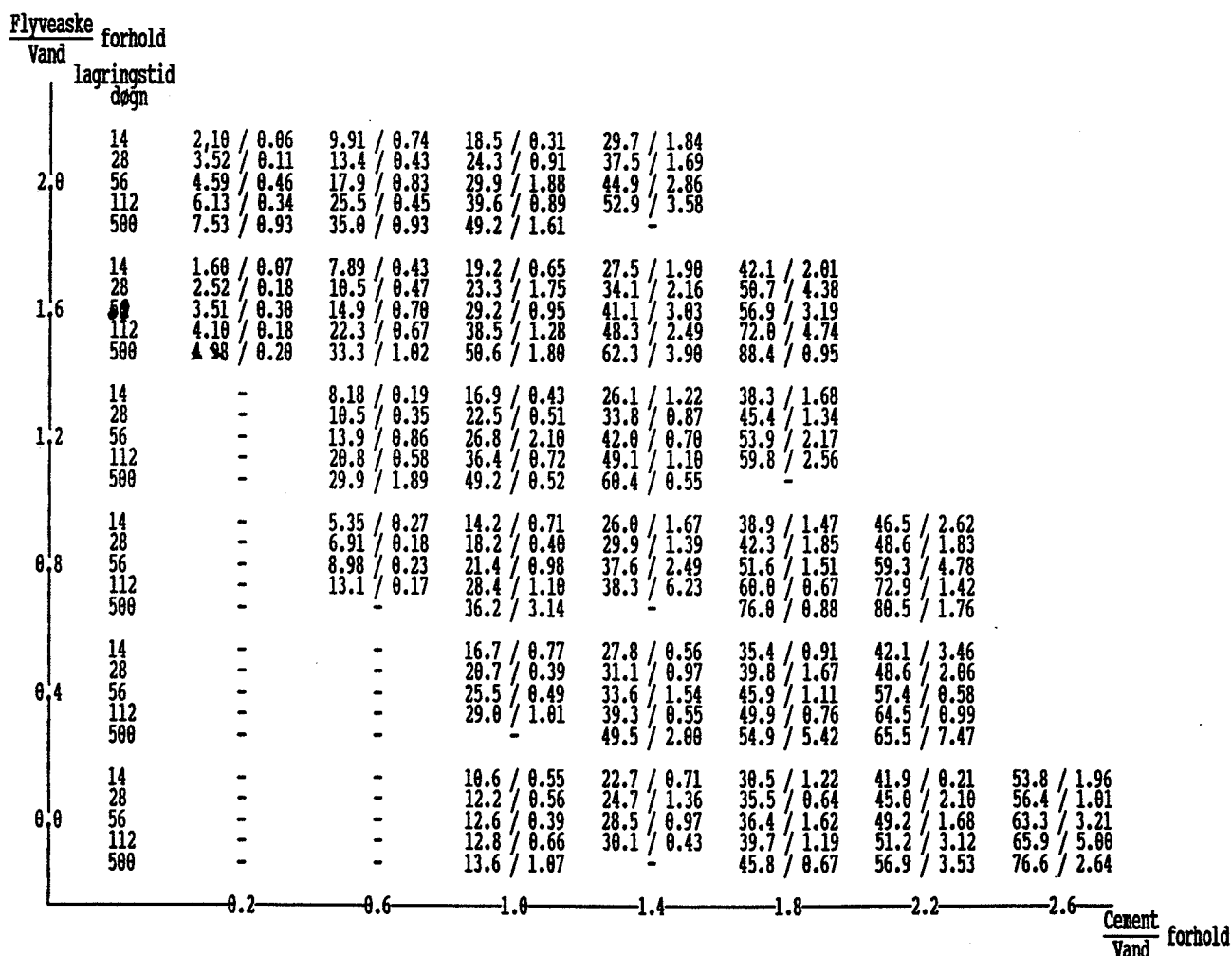
Tabel 6.6a Middeltrykstyrker og spredninger i MPa for serie 1 fremstillet med Lavalkali cement og Asnæs flyveaske.



Tabel 6.6b Middeltrykstyrker og spredninger i MPa for serie 2 fremstillet med Lavalkali cement og Thy flyveaske.



Tabel 6.6c Middeltrykstyrker og spredninger i MPa for serie 3 fremstillet med Slite cement og Asnæs flyveaske.



Tabel 6.6d Middeltrykstyrker og spredninger i MPa for serie 4 fremstillet med Slite cement og Thy flyveaske.

Flyveaske Vand forhold											
		lagringstid døgn									
2.00	14		4.93 / 0.24	10.53 / 0.61	15.41 / 0.35	25.38 / 0.71	28.25 / 0.36	33.24 / 0.71	37.85 / 1.01		
	28		6.54 / 0.41	13.14 / 0.22	19.39 / 0.52	29.80 / 0.90	34.64 / 1.30	38.74 / 1.59	43.53 / 1.29		
	56		10.31 / 0.59	17.11 / 0.96	23.39 / 0.87	34.20 / 0.45	39.93 / 1.43	44.30 / 1.70	48.75 / 3.36		
	112		15.10 / 0.63	25.03 / 0.55	29.80 / 1.00	41.00 / 0.95	44.68 / 2.04	51.35 / 1.46	57.50 / 2.22		
1.67	14		4.56 / 0.17	9.93 / 0.55	16.24 / 0.56	23.70 / 0.56	26.40 / 0.36	32.48 / 1.05	38.35 / 1.05		
	28		5.95 / 0.26	12.15 / 0.46	18.84 / 0.62	29.40 / 0.86	32.54 / 0.35	39.10 / 1.59	45.60 / 1.07		
	56		9.26 / 0.46	16.09 / 0.65	23.68 / 0.92	33.88 / 1.30	39.15 / 0.26	45.74 / 1.48	49.08 / 1.87		
	112		14.44 / 0.81	22.58 / 1.00	30.03 / 0.91	39.30 / 0.90	43.75 / 1.75	50.88 / 0.67	54.90 / 2.29		
1.33	14		3.59 / 0.08	8.23 / 0.49	15.31 / 0.44	20.90 / 0.45	27.34 / 0.41	33.34 / 1.16	37.22 / 1.43		
	28		4.89 / 0.11	10.53 / 0.51	19.48 / 0.23	26.80 / 0.52	33.28 / 1.38	38.95 / 1.47	42.93 / 0.88		
	56		7.23 / 0.33	13.65 / 0.55	21.94 / 1.04	29.56 / 1.30	39.18 / 1.30	42.28 / 2.43	50.38 / 3.43		
	112		12.63 / 0.30	19.09 / 0.51	28.63 / 1.10	35.00 / 0.80	43.41 / 1.62	49.53 / 2.93	54.33 / 1.30		
1.00	14		3.55 / 0.21	8.20 / 0.23	14.43 / 0.60	20.15 / 0.62	25.43 / 0.60	33.21 / 0.54	35.45 / 1.50		
	28		4.74 / 0.17	9.80 / 0.37	17.54 / 0.43	24.57 / 0.69	29.70 / 2.12	38.64 / 1.16	40.00 / 2.72		
	56		6.46 / 0.17	12.50 / 0.23	20.80 / 0.61	29.03 / 0.87	36.73 / 1.53	44.50 / 2.10	48.90 / 0.88		
	112		8.08 / 0.35	13.23 / 0.60	21.73 / 0.35	35.40 / 0.80	38.15 / 1.14	46.23 / 1.12	54.18 / 2.44		
0.67	14		2.95 / 0.17	6.56 / 0.50	11.90 / 0.96	19.40 / 0.60	23.52 / 0.67	28.91 / 1.06	35.18 / 1.34		
	28		3.63 / 0.38	8.75 / 0.50	15.49 / 0.72	24.30 / 1.05	27.60 / 1.36	34.26 / 0.78	38.90 / 1.77		
	56		5.05 / 0.19	9.89 / 0.42	18.34 / 0.67	28.70 / 0.81	33.80 / 0.60	40.79 / 1.17	45.68 / 2.02		
	112		8.08 / 0.35	13.23 / 0.60	21.73 / 0.35	35.40 / 0.80	38.15 / 1.14	46.23 / 1.12	54.18 / 2.44		
0.33	14		2.43 / 0.12	5.34 / 0.38	10.11 / 0.36	17.04 / 0.40	21.70 / 0.70	28.36 / 0.92	32.13 / 1.07		
	28		3.11 / 0.16	6.94 / 0.10	12.75 / 0.46	20.10 / 0.55	25.03 / 1.13	31.85 / 1.02	37.00 / 1.23		
	56		3.94 / 0.12	8.75 / 0.31	16.09 / 0.40	25.48 / 0.98	30.33 / 0.82	36.98 / 1.72	41.70 / 1.72		
	112		5.49 / 0.28	10.85 / 0.56	19.38 / 0.45	30.40 / 1.40	36.15 / 1.51	44.40 / 1.06	47.23 / 1.38		
0.00	14		1.95 / 0.07	5.11 / 0.13	9.33 / 0.14	15.08 / 0.66	20.90 / 0.40	28.83 / 0.70	32.43 / 0.73		
	28		2.27 / 0.09	5.95 / 0.16	10.50 / 0.40	17.40 / 0.50	23.20 / 0.93	33.20 / 2.40	36.59 / 1.12		
	56		2.86 / 0.09	7.54 / 0.06	12.55 / 0.24	20.40 / 0.30	26.44 / 0.58	36.68 / 1.37	40.83 / 0.71		
	112		3.55 / 0.19	8.96 / 0.23	15.38 / 1.51	23.14 / 0.33	30.28 / 0.98	42.13 / 1.56	44.36 / 1.35		
			0.2	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6		
											Cement Vand forhold

Tabel 6.7 Middeltrykstyrker og spredninger i MPa for en tidligere undersøgt betonserie fremstillet med Hvid Portland cement og Asnæs flyveaske.

General Linear Models Procedure					
Class Level Information					
Class	Levels	Values			
CEMENT	2	LAVAL SLITE			
ASKE	2	ASN THY			
Number of observations in data set = 105					
NOTE: Due to missing values, only 103 observations can be used in this analysis.					
----- 0 -----					
Påvirker cement- og flyveasketypen styrken?					
(model: Styrken = A*c/v + E + G(ctype) + H(ftype) + I(ctype*ftype))					
General Linear Models Procedure					
Dependent Variable: Styrken					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	23941.2688	5985.3172	352.50	0.0001
Error	98	1663.9804	16.9793		
Corrected Total	102	25605.2492			
R-Square		C.V.	Root MSE	F28 Mean	
0.935014		15.392235	4.12060	26.7706796	
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
C/V forhold	1	23746.7205	23746.7205	1398.56	0.0001
CEMENTTYPE	1	132.9827	132.9827	7.83	0.0062
ASKETYPE	1	1.5054	1.5054	0.09	0.7665
CEMENT*ASKETYPE	1	45.7487	45.7487	2.69	0.1039

Tabel 6.8

Eksempel på udskrift fra GLM-undersøgelsen af den lineære styrke-model i ligning 6.14, som indeholder den kontinuerte variabel, c/v forholdet, samt de diskret fordelte variable, cementtype, flyveasketype og vekselvirkningen mellem cement- og flyveasketypen.

ALDER (DØGN)	MODEL	R ²	Pr > F		
			cement	aske	cement*aske
14	6.14	0.94	0.0001	0.9791	0.2605
	6.15	0.96	0.0001	0.7141	0.1822
28	6.14	0.94	0.0062	0.7665	0.1039
	6.15	0.96	0.0001	0.3822	0.0522
56	6.14	0.90	0.4946	0.3330	0.1463
	6.15	0.96	0.6265	0.0320	0.0715
112	6.14	0.85	0.1164	0.6015	0.1683
	6.15	0.95	0.0494	0.1351	0.0932

Tabel 6.9

Hovedresultatet fra analysen vedrørende cementtypens, flyveasketypens og den kombinerede cement- og flyveasketypes virkning på flyveaskebetons trykstyrke.

Dep Variable: styrken					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	198173.98542	63391.32847	382.494	0.0001
Error	51	8452.31774	165.73172		
C Total	54	198626.30316			
Root MSE		12.87368	R-Square	0.9574	
Dep Mean		19.93127	Adj R-Sq	0.9549	
C.V.		64.59848			
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > T
INTERCEP	1	-12.841596	2.01984734	-6.360	0.0001
c/v forhold	1	24.174456	1.23724127	19.539	0.0001
f/v forhold	1	3.531482	1.44238328	2.448	0.0178
c/v*f/v forhold	1	-1.088106	0.99879353	-1.090	0.2888

Tabel 6.10 Eksempel på udskrift fra REG undersøgelsen af den lineære model i ligning 6.7a til beregning af styrken for beton, som fremstilles med Lavalkali cement og Asnæs eller Thy flyveaske.

CEMENT TYPE	ALDER DØGN	Den udvidede model uden restriktioner				
		A_1	B_1	D_1	E_1	R^2
LAVALKALI	14	24.2	3.5	<u>-1.1</u>	-12.8	0.95
	28	27.0	<u>2.63</u>	<u>1.15</u>	-12.6	0.97
	56	30.7	<u>-0.5</u>	5.14	-11.1	0.97
	112	36.2	<u>2.94</u>	5.22	-14.2	0.96
SLITE	14	23.7	<u>2.19</u>	<u>2.17</u>	-10.5	0.96
	28	26.2	3.25	2.58	-11.3	0.96
	56	28.7	<u>2.44</u>	4.47	-10.8	0.97
	112	30.3	<u>3.27</u>	7.46	-10.5	0.96
	500	28.3	<u>1.49</u>	13.1	<u>-1.8</u>	0.95
HVID	14	27.1	3.37	<u>0.41</u>	-11.1	0.97
	28	30.1	3.63	<u>1.44</u>	-11.7	0.97
	56	33.6	5.02	<u>1.31</u>	-12.3	0.98
	112	37.0	8.80	<u>-1.0</u>	-11.9	0.96

Tabel 6.11 Estimerede værdier for konstanterne i Bolomeys udvidede, ikke restriktive styrkemodel i ligning 6.7, samt de opnåede korrelationskoefficienter for modellen.

CEMENT	ALDER	Bolomeys udvidede restriktive model				
TYPE	DØGN	A	B	D	E	R2
LAVALKALI	14	23.6	3.96	<u>-0.09</u>	-14.6	0.95
	28	26.5	3.96	0.99	-13.4	0.97
	56	30.1	3.96	4.23	-15.0	0.95
	112	33.1	3.96	6.85	-14.3	0.95
SLITE	14	24.9	5.84	<u>0.41</u>	-14.1	0.95
	28	27.2	5.84	1.50	-14.1	0.96
	56	31.9	5.84	3.96	-18.5	0.96
	112	33.2	5.84	7.91	-18.2	0.95
	500	41.8	5.84	13.3	-27.7	0.85
HVID	14	27.0	4.05	<u>0.04</u>	-11.3	0.97
	28	29.8	4.05	1.54	-12.1	0.97
	56	32.8	4.05	2.80	-12.5	0.98
	112	35.5	4.05	4.62	-12.4	0.94

Tabel 6.12 Estimerede værdier for konstanterne i Bolomeys udvidede restriktive styrkemodel i ligning 6.7, samt de opnåede korrelationskoefficienter med modellen.

CEMENT TYPE	DE ESTIMEREDE LIGNINGER FOR KONSTANTERNE I BOLOMEYS UDVIDEDE REKSTRIKTIVE MODEL	KORRELATIONS- KOEFFICIENT R2
LAVALKALI	$A = 4.63 * \ln(t) + 11.29$ $D = 3.47 * \ln(t) - 9.77$ $E = -0.11 * \ln(t) - 13.91$	0.998 0.95 0.47
SLITE	$A = 4.72 * \ln(t) + 12.04$ $D = 3.80 * \ln(t) - 10.47$ $E = -3.85 * \ln(t) - 2.40$	0.98 0.97 0.88
HVID	$A = 4.13 * \ln(t) + 16.05$ $D = 2.16 * \ln(t) - 5.71$ $E = -0.55 * \ln(t) - 10.01$	0.999 0.99 0.70

Tabel 6.13 Oversigt over værdierne for konstanterne i Bolomeys udvidede, restriktive styrkemodel, som funktion af betonens alder(t) og den anvendte cementtype.

T / w/c	28 days curing			90 days curing		
	0.40	0.50	0.60	0.40	0.50	0.60
Standard 20°C	-	92	-	-	29	-
30°C	41	116	139	5.8	37	88
50°C	-	137	-	-	66	-
RHPC 20°C	-	122	-	-	100	-
30°C	67	132	263	45	125	257
50°C	-	289	-	-	284	-
SRPC 20°C	-	151	-	-	140	-
30°C	106	193	279	83	171	160
50°C	-	370	-	-	388	-

Tabel 7.1 Effektive diffusionskoefficienter for cementpastaer, $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ (Hansson [63]).

Cement Type	(a) [Cl ⁻]/[OH ⁻] (mmol/l) Ratio	(b) Chloride diffusivity ($\times 10^8$) (cm^2/s)	(c) I_{corr} (nA/cm^2)
OPC-A	83/741 = 0.112	3.14	46.6
OPC-B	41/661 = 0.062	4.47	*
OPC-B/ 30% PFA	39/457 = 0.085	1.47	30.6
OPC-B/ 65% BFS	28/457 = 0.061	0.41	40.9
SRPC	110/501 = 0.220	10.00	233.0

Tabel 7.2 Diffusionskoefficienter for forskellige cementpastaer (Page [64]).

Cement	Diffusivity for Cl^- ($\text{cm}^2/\text{s}) \times 10^{-9}$			
	w/b = 0.40	w/b = 0.50	w/b = 0.60	w/b = 0.70
OPC	18	68	187	
OPC+SP	34			
OPC/10% CSF	18	24	99	
OPC/10% CSF+SP	20	23		
OPC/20% CSF	3.2	5.9	31	63
OPC/20% CSF+SP	3.0	21		
OPC/15% PFA 1	6.3	32	26	
OPC/15% PFA 2		36		
OPC/40% PFA 1	0.79	1.3	17	
OPC/40% PFA 2		3.2		

Tabel 7.3 Diffusionskoefficienter for kloridioner ved 22°C for forskellige cementpastaer (Byfors [65]).

Cement	Measured pH
OPC	13,39 13,41
OPC/10% CSF+SP	13,10 12,98
OPC/20% CSF+SP	12,78 12,68
OPC/15% PFA 1	13,09 13,05
OPC/40% PFA 1	13,17 13,19

Tabel 7.4 Målte pH-værdier i poreopløsninger pressede ud fra forskellige cementpastaer. Vand/pulver = 0.50 (Byfors [65]).

----- CEMENT=LAVAL ASKE=' ' -----

OBS	Blande- forhold			14døgn			vandlagring			Initieringstid i døgn			28døgn			vandlagring			56døgn			vandlagring		
	C/V	F/V		K14A	K14B	K14C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C	K56A	K56B	K56C	K56A	K56B	K56C
1	1.0	0.0		3.50	4.50	5.0	0.00	5.50	11.30	4.20	5.50	8.9												
2	1.4	0.0		11.20	18.10	38.1	19.20	46.20	59.00	11.50	17.00	19.0												
3	1.8	0.0		11.10	12.00	20.4	16.50	18.30	22.40	21.00	22.00	43.0												
4	2.2	0.0		21.00	23.00	43.0	25.00	46.00	49.00	64.00	68.00	77.0												
5	2.6	0.0		93.00	116.00	206.0	85.00	135.00	145.00	129.00	280.00	344.0												

----- CEMENT=LAVAL ASKE=ASN -----

OBS	Blande- forhold			14døgn			vandlagring			Initieringstid i døgn			28døgn			vandlagring			56døgn			vandlagring		
	C/V	F/V		K14A	K14B	K14C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C	K56A	K56B	K56C	K56A	K56B	K56C
6	0.2	1.6		0.20	0.50	0.6	0.30	0.30	0.40	0.50	0.60	0.6												
7	0.2	2.0		0.50	0.70	0.8	0.60	0.70	0.70	0.60	0.70	0.8												
8	0.6	0.8		2.00	2.50	6.5	0.30	1.40	3.50	0.90	2.40	2.5												
9	0.6	1.2		1.50	2.40	1.1	1.40	1.70	2.40	0.50	1.40	2.1												
10	0.6	1.6		1.80	1.90	2.7	2.20	2.30	2.50	2.00	2.50	3.5												
11	0.6	2.0		1.30	1.60	1.8	1.20	1.40	2.30	1.80	2.50	3.3												
12	1.0	0.4		1.40	2.80	4.0	2.90	3.10	7.50	3.90	5.60	6.9												
13	1.0	0.8		3.80	5.10	6.0	4.90	5.20	6.50	8.10	8.50	12.3												
14	1.0	1.2		1.50	4.10	4.4	4.80	5.20	7.50	4.10	7.00	11.3												
15	1.0	1.6		3.50	6.50	7.0	2.20	4.00	4.00	4.90	6.10	6.9												
16	1.0	2.0		2.40	5.60	7.8	3.40	5.80	7.60	3.50	9.70	11.5												
17	1.4	0.4		6.40	7.40	8.3	15.40	16.30	19.40	32.00	46.00	46.0												
18	1.4	0.8		9.00	12.00	16.0	16.40	17.10	36.00	24.60	29.60	36.3												
19	1.4	1.2		7.50	11.70	13.5	13.60	24.50	32.30	11.60	12.50	31.0												
20	1.4	1.6		7.60	10.60	18.8	13.70	11.50	16.30	17.30	28.40	33.6												
21	1.4	2.0		6.90	12.50	28.8	14.00	15.00	20.00	5.00	17.80	54.0												
22	1.8	0.4		15.30	22.00	16.3	18.80	21.50	43.60	36.00	57.00	65.0												
23	1.8	0.8		13.50	19.50	20.0	17.90	21.80	30.00	38.00	38.00	91.0												
24	1.8	1.2		15.50	35.00	46.5	54.50	86.00	126.00	56.00	320.00	400.0												
25	1.8	1.6		18.90	35.90	71.5	30.60	45.70	55.00	43.50	99.00	128.0												
26	2.2	0.4		20.00	22.00	73.0	66.00	70.00	86.00	45.00	37.00	74.0												
27	2.2	0.8		65.00	70.00	98.0	46.00	68.00	85.00	297.00	333.00	588.0												

----- CEMENT=LAVAL ASKE=THY -----

OBS	Blande- forhold			14døgn			vandlagring			Initieringstid i døgn			28døgn			vandlagring			56døgn			vandlagring		
	C/V	F/V		K14A	K14B	K14C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C	K56A	K56B	K56C	K56A	K56B	K56C
28	0.2	1.6		0.30	0.80	1.3	0.80	1.30	1.40	0.10	0.10	0.1												
29	0.2	2.0		0.80	1.00	1.3	0.40	0.50	0.50	0.10	0.10	0.1												
30	0.6	0.8		1.00	1.80	1.9	1.60	1.90	2.80	4.70	6.00	7.1												
31	0.6	1.2		0.10	1.90	2.1	0.30	0.40	1.90	0.20	0.60	0.7												
32	0.6	1.6		1.20	1.30	2.0	2.00	2.80	3.90	1.40	2.00	2.0												
33	0.6	2.0		1.60	2.00	2.1	2.20	2.50	2.50	2.50	8.00	17.8												
34	1.0	0.4		3.60	4.00	6.4	4.50	7.10	7.80	10.80	16.40	31.9												
35	1.0	0.8		2.50	5.30	6.2	6.40	7.30	10.00	7.00	11.00	11.0												
36	1.0	1.2		5.50	6.80	8.5	7.30	8.00	11.00	9.50	12.20	28.0												
37	1.0	1.6		6.50	8.90	12.5	1.00	6.50	18.60	8.00	16.00	16.0												
38	1.0	2.0		2.30	6.50	7.1	4.80	5.40	23.30	3.00	7.30	14.0												
39	1.4	0.4		11.50	15.30	25.2	20.50	21.30	29.90	12.00	14.60	24.2												
40	1.4	0.8		5.80	7.20	9.0	22.00	22.00	22.00	43.00	88.00	122.0												
41	1.4	1.2		8.90	10.20	15.8	17.90	23.00	23.00	16.00	72.00	107.0												
42	1.4	1.6		1.00	12.60	32.0	10.00	50.00	67.00	15.00	21.00	55.0												
43	1.4	2.0		13.00	13.00	13.0	5.00	20.10	35.90	53.00	123.00	512.0												
44	1.8	0.4		12.80	14.00	16.0	27.10	28.40	33.40	26.30	146.00	150.0												
45	1.8	0.8		19.00	26.00	27.0	51.00	663.00	663.00	635.00	635.00	635.0												
46	1.8	1.2		57.00	81.80	101.0	595.00	595.00	595.00	612.00	612.00	612.0												
47	1.8	1.6		24.50	56.00	82.5	161.00	397.00	570.00	606.00	606.00	606.0												
48	2.2	0.4		51.20	63.00	63.0	110.00	118.00	352.00	115.00	514.00	602.0												
49	2.2	0.8		57.00	69.00	700.0	157.00	575.00	686.00	658.00	658.00	658.0												

Tabel 7.5

De opnåede korrosions-initieringstider den 1. maj 1988, for de enkelte armeringsjern i hver betonprøve efter henholdsvis 14, 28 og 56 døgn startvandlagring; (Ikke korroderende jern per 1. maj 1988 er understreget i tabellen.)

----- CEMENT=SLITE ASKE=' ' -----

OBS	Blande- forhold		14døgn vandlagring			Initieringstid i døgn			56døgn vandlagring		
	C/V	F/V	K14A	K14B	K14C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C
50	1.0	0.0	8.50	9.80	17.8	8.70	10.50	13.40	14.00	15.60	19.4
51	1.4	0.0	15.10	17.30	18.7	17.00	24.00	25.00	29.00	44.00	66.0
52	1.8	0.0	53.00	55.00	56.0	81.00	82.00	156.00	72.00	129.00	143.0
53	2.2	0.0	60.00	71.00	124.0	97.00	110.00	128.00	126.00	231.00	302.0
54	2.6	0.0	54.00	79.00	104.0	134.00	147.00	232.00	206.00	237.00	267.0

----- CEMENT=SLITE ASKE=ASN -----

OBS	Blande- forhold		14døgn vandlagring			Initieringstid i døgn			56døgn vandlagring		
	C/V	F/V	K14A	K14B	K14C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C
55	0.2	1.6	.	.	.	1.00	1.10	1.20	1.40	1.60	2.2
56	0.2	2.0	.	.	.	0.80	0.90	1.00	1.60	2.00	2.1
57	0.6	0.8	2.10	2.80	2.9	2.30	4.40	6.40	4.80	5.20	8.7
58	0.6	1.2	4.80	4.90	6.3	9.70	12.00	13.70	18.10	27.50	51.2
59	0.6	1.6	3.90	5.80	7.9	6.30	8.90	11.50	10.20	13.70	14.4
60	0.6	2.0	10.70	11.20	12.3	11.00	41.00	49.00	30.00	36.00	47.0
61	1.0	0.4	6.90	9.70	12.1	16.80	17.10	17.60	13.70	18.10	19.3
62	1.0	0.8	19.40	22.20	31.5	30.00	45.00	37.00	4.20	6.00	213.0
63	1.0	1.2	27.80	52.00	101.0	63.00	100.00	108.00	462.00	462.00	462.0
64	1.0	1.6	12.90	14.50	17.5	229.00	411.00	411.00	344.00	439.00	439.0
65	1.0	2.0	53.00	70.00	82.0	156.00	188.00	199.00	215.00	322.00	457.0
66	1.4	0.4	13.80	14.00	10.7	10.00	15.00	18.00	11.80	24.70	26.0
67	1.4	0.8	24.00	522.00	522.0	134.00	226.00	266.00	480.00	480.00	480.0
68	1.4	1.2	67.00	84.00	105.0	137.00	227.00	482.00	454.00	454.00	454.0
69	1.4	1.6	256.00	395.00	539.0	116.00	278.00	525.00	497.00	497.00	497.0
70	1.4	2.0	504.00	504.00	504.0	490.00	490.00	490.00	462.00	462.00	462.0
71	1.8	0.4	24.50	33.30	39.0	16.80	26.20	98.00	63.00	153.00	206.0
72	1.8	0.8	31.60	61.00	105.0	216.00	227.00	230.00	308.00	314.00	347.0
73	1.8	1.2	144.00	174.00	546.0	350.00	532.00	532.00	504.00	504.00	504.0
74	1.8	1.6	522.00	522.00	522.0	508.00	508.00	508.00	480.00	480.00	480.0
75	2.2	0.4	141.00	206.00	230.0	92.00	98.00	153.00	80.00	82.00	177.0
76	2.2	0.8	153.00	191.00	192.0	105.00	163.00	332.00	207.00	298.00	497.0

----- CEMENT=SLITE ASKE=THY -----

OBS	Blande- forhold		14døgn vandlagring			Initieringstid i døgn			56døgn vandlagring		
	C/V	F/V	K14A	K14B	K14C	K28A	K28B	K28C	K56A	K56B	K56C
77	0.2	1.6	0.25	0.63	1.1	0.02	0.02	0.17	0.04	0.04	0.1
78	0.2	2.0	1.60	1.90	2.1	0.10	1.20	1.50	0.10	0.10	0.2
79	0.6	0.8	4.70	8.90	13.0	10.50	17.80	21.60	31.00	83.00	519.0
80	0.6	1.2	9.90	13.70	18.7	14.00	24.00	616.00	588.00	588.00	588.0
81	0.6	1.6	27.00	31.00	61.0	613.00	613.00	613.00	585.00	585.00	585.0
82	0.6	2.0	10.30	14.40	19.8	92.00	620.00	620.00	592.00	592.00	592.0
83	1.0	0.4	15.40	17.10	18.0	26.00	36.00	38.00	14.00	54.00	116.0
84	1.0	0.8	24.20	29.90	37.0	49.00	93.00	234.00	22.00	607.00	607.0
85	1.0	1.2	16.00	75.00	159.0	2.00	129.00	246.00	3.20	26.00	615.0
86	1.0	1.6	44.00	150.00	622.0	608.00	608.00	608.00	65.00	580.00	580.0
87	1.0	2.0	649.00	649.00	649.0	635.00	635.00	635.00	1.00	122.00	607.0
88	1.4	0.4	48.00	58.00	107.0	31.00	62.00	75.00	75.00	213.00	233.0
89	1.4	0.8	127.00	608.00	608.0	594.00	594.00	594.00	566.00	566.00	566.0
90	1.4	1.2	131.00	642.00	642.0	276.00	628.00	628.00	6.00	130.00	600.0
91	1.4	1.6	637.00	637.00	637.0	623.00	623.00	623.00	595.00	595.00	595.0
92	1.4	2.0	620.00	620.00	620.0	606.00	606.00	606.00	578.00	578.00	578.0
93	1.8	0.4	33.00	53.00	484.0	470.00	608.00	608.00	361.00	580.00	580.0
94	1.8	0.8	34.00	114.00	156.0	193.00	224.00	546.00	518.00	518.00	518.0
95	1.8	1.2	566.00	566.00	566.0	90.00	552.00	552.00	524.00	524.00	524.0
96	1.8	1.6	651.00	651.00	651.0	637.00	637.00	637.00	607.00	607.00	607.0
97	2.2	0.4	175.00	241.00	495.0	270.00	528.00	577.00	600.00	600.00	600.0
98	2.2	0.8	642.00	642.00	642.0	628.00	628.00	628.00	600.00	600.00	600.0

Tabel 7.5 Korrosions-initieringstider (fortsat).

INITIERINGSTID OG SPREDNING I DØGN		C/V FORHOLD													
		0.2		0.6		1		1.4		1.8		2.2		2.6	
		KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)														
2.0	14	0.7	0.2	1.6	0.3	5.3	2.7	16.1	11.4						
	28	0.7	0.1	1.6	0.6	5.6	2.1	16.3	3.2						
	56	0.7	0.1	2.5	0.8	8.2	4.2	25.6	25.4						
1.6	LAGRING (døgn)														
	14	0.4	0.2	2.1	0.5	5.7	1.9	12.3	5.8	42.1	26.8				
	28	0.3	0.1	2.3	0.2	3.4	1.0	13.8	2.4	43.8	12.3				
	56	0.6	0.1	2.7	0.8	6.0	1.0	26.4	8.3	98.2	42.9				
1.2	LAGRING (døgn)														
	14			1.7	0.7	3.3	1.6	10.9	3.1	32.3	15.7				
	28			1.8	0.5	5.8	1.5	23.5	9.4	88.8	35.8				
	56			1.3	0.8	7.5	3.6	18.4	11.0	258.7	180.0				
0.8	LAGRING (døgn)														
	14			3.7	2.5	5.0	1.1	12.3	3.5	17.7	3.6	77.7	17.8		
	28			1.7	1.6	5.5	0.9	23.2	11.1	23.2	6.2	66.3	19.6		
	56			1.9	0.9	9.6	2.3	30.2	5.9	55.7	30.6	406.0	158.6		
0.4	LAGRING (døgn)														
	14					2.7	1.3	7.4	1.0	17.9	3.6	38.3	30.0		
	28					4.5	2.6	17.0	2.1	28.0	13.6	74.0	10.6		
	56					5.5	1.5	41.3	8.1	52.7	15.0	52.0	19.5		
0.0	LAGRING (døgn)														
	14					4.3	0.8	22.5	14.0	14.5	5.1	29.0	12.2	138.3	59.7
	28					5.6	5.7	41.5	20.3	19.1	3.0	40.0	13.1	121.7	32.1
	56					6.2	2.4	15.8	3.9	28.7	12.4	69.7	6.7	251.0	110.4

Tabel 7.6a Korrosions-initieringstiden for serie 1 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

INITIERINGSTID OG SPREDNING I DØGN		C/V FORHOLD													
		0.2		0.6		1		1.4		1.8		2.2		2.6	
		KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)														
2.0	14	1.0	0.3	1.9	0.3	5.3	2.6	13.0							
	28	0.5	0.1	2.4	0.2	11.2	10.5	20.3	15.5						
	56	0.1		9.4	7.8	8.1	5.5	229.3	247.3						
1.6	LAGRING (døgn)														
	14	0.8	0.5	1.5	0.4	9.3	3.0	15.2	15.7	54.3	29.0				
	28	1.2	0.3	2.9	1.0	8.7	9.0	42.3	29.3	376.0	205.3				
	56	0.1		1.8	0.3	13.3	4.6	30.3	21.6	>606					
1.2	LAGRING (døgn)														
	14			1.4	1.1	6.9	1.5	11.6	3.7	79.9	22.1				
	28			0.9	0.9	8.8	2.0	21.3	2.9	>595					
	56			0.5	0.3	16.6	10.0	65.0	45.9	>612					
0.8	LAGRING (døgn)														
	14			1.6	0.5	4.7	1.9	7.3	1.6	24.0	4.4	>275.3	>367.8		
	28			2.1	0.6	7.9	1.9	22.0		>459.0	>353.3	>472.7	>279.0		
	56			5.9	1.2	9.7	2.3	84.3	39.6	>635		>658			
0.4	LAGRING (døgn)														
	14					4.7	1.5	17.3	7.1	14.3	1.6	59.1	6.8		
	28					6.5	1.7	23.9	5.2	29.6	3.3	193.3	137.5		
	56					19.7	10.9	16.9	6.4	107.4	70.3	410.3	259.5		
0.0	LAGRING (døgn)														
	14					4.3	0.8	22.5	14.0	14.5	5.1	29.0	12.2	130.3	59.7
	28					5.6	5.7	41.5	20.3	19.1	3.0	40.0	13.1	121.7	32.1
	56					6.2	2.4	15.8	3.9	28.7	12.4	69.7	6.7	251.0	110.4

Tabel 7.6b Korrosions-initieringstiden for serie 2 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG THY FLYVEASKE.

INITIERINGSTID OG SPREDNING I DØGN		C/V FORHOLD													
		0.2		0.6		1		1.4		1.8		2.2		2.6	
		KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)														
2.0	14			11.4	0.8	68.3	14.6	>504							
	28	0.9	0.1	33.7	20.0	181.0	22.3	>490							
	56	1.9	0.3	37.7	8.6	>331	>121	>462							
1.6	LAGRING (døgn)														
	14			5.9	2.0	15.0	2.3	>396.7	>141.5	>522					
	28	1.1	0.1	0.9	2.6	>350	>105	>306	>206	>500					
	56	1.7	0.4	12.0	2.3	>407	>55	>497		>480					
1.2	LAGRING (døgn)														
	14			5.3	0.8	60.3	37.3	85.3	19.0	>288	>224				
	28			11.8	2.0	90.3	24.0	>282	>179	>471	>105				
	56			32.3	17.1	>462		>454		>504					
0.8	LAGRING (døgn)														
	14			2.6	0.4	24.4	6.3	>365	>288	65.9	36.9	178.7	22.2		
	28			4.4	2.1	37.3	7.5	200.7	67.7	224.3	7.4	200.0	117.9		
	56			6.2	2.1	74.4	120.0	>400		323.0	21.0	>334.0	>148.3		
0.4	LAGRING (døgn)														
	14					9.6	2.6	12.8	1.9	32.3	7.3	192.3	46.0		
	28					17.2	0.4	14.3	4.0	47.0	44.4	114.3	33.6		
	56					17.0	2.9	20.0	7.9	140.7	72.3	113.0	55.4		
0.0	LAGRING (døgn)														
	14					12.0	5.0	17.0	1.8	54.7	1.5	85.0	34.2	79.0	25.0
	28					10.9	2.4	22.0	4.4	106.3	43.0	111.7	15.6	171.0	53.2
	56					16.3	2.0	46.3	18.6	114.7	37.6	219.7	88.5	236.7	30.5

Tabel 7.6c Korrosions-initieringstiden for serie 3 fremstillet med SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

INITIERINGSTID OG SPREDNING I DØGN		C/V FORHOLD													
		0.2		0.6		1		1.4		1.8		2.2		2.6	
		KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN	KLORTID	SPREDN
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)														
2.0	14	1.9	0.3	14.0	4.0	>649		>620							
	28	0.9	0.7	>444	>305	>635		>606							
	56	0.1	0.1	>592		>243	>321	>578							
1.6	LAGRING (døgn)														
	14	0.7	0.4	39.7	18.6	>272	>300	>637		>651					
	28	0.1	0.1	>613		>600		>623		>637					
	56	0.1	0.0	>585		>400	>297	>595		>607					
1.2	LAGRING (døgn)														
	14			14.1	4.4	83.3	71.9	>472	>295	>566					
	28			>210	>345	125.7	122.0	>511	>203	>390	>267				
	56			>588		>415	>347	>245	>313	>524					
0.8	LAGRING (døgn)														
	14			8.9	4.2	30.4	6.4	>448	>278	101.3	62.0	>642			
	28			16.6	5.6	125.3	96.6	>594		>321	>196	>628			
	56			211.0	268.0	>412	>338	>566		>518		>600			
0.4	LAGRING (døgn)														
	14					16.0	1.3	71.0	31.6	190	255	303.7	169.0		
	28					33.3	6.4	56.0	22.6	>562	>00	458.3	164.9		
	56					61.3	51.4	173.7	86.0	>507	>126	>600			
0.0	LAGRING (døgn)														
	14					12.0	5.0	17.0	1.8	54.7	1.5	85.0	34.2	79.0	25.0
	28					10.9	2.4	22.0	4.4	106.3	43.0	111.7	15.6	171.0	53.2
	56					16.3	2.0	46.3	18.6	114.7	37.6	219.7	88.5	236.7	30.5

Tabel 7.6d Korrosions-initieringstiden for serie 4 fremstillet med SLITE CEMENT OG THY FLYVEASKE.

Vandlagrings- tid	A_4	
	Flyveasketype Asnæs	Thy
14	2.0	1.5
28	1.5	1.0
56	1.25	0.75

Tabel 7.7 Værdien af konstanten A_4 i ligning (7.12), som funktion af flyveasketypen og vandlagringstiden for flyveaskebeton, der er fremstillet med Slite cement.

DIFFUSIONS- KOEFFICIENT ($\text{mm}^2/\text{År}$)		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
		MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)							
2.0	14	7699	3276	975	433			
	28	7699	3143	917	274			
	56	7333	2826	623	267			
1.6	LAGRING (døgn)							
	14	11845	2406	906	416	282		
	28	15398	2208	1518	371	117		
	56	9058	1925	868	194	57		
1.2	LAGRING (døgn)							
	14		3088	1548	471	159		
	28		2808	880	219	75		
	56		3850	687	279	72		
0.8	LAGRING (døgn)							
	14		1408	1033	416	291	66	
	28		2961	928	222	221	77	
	56		2655	533	178	92	13	
0.4	LAGRING (døgn)							
	14			1878	697	287	134	
	28			1141	301	184	69	
	56			939	124	97	99	
0.0	LAGRING (døgn)							
	14			1184	229	354	177	48
	28			917	124	269	128	42
	56			828	324	179	74	23

Tabel 7.8a Klorid-diffusionskoefficienter i $\text{mm}^2/\text{År}$ for serie 1 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

DIFFUSIONS- KOEFFICIENT ($\text{mm}^2/\text{År}$)		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
		MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)							
2.0	14	4967	2701	968	395			
	28	18999	2139	460	252			
	56	51328	544	634	22			
1.6	LAGRING (døgn)							
	14	6416	3422	552	338	94		
	28	4408	1778	598	121	14		
	56	51328	2852	385	169	< 8		
1.2	LAGRING (døgn)							
	14		3756	748	441	64		
	28		5922	585	241	< 9		
	56		18266	318	79	< 8		
0.8	LAGRING (døgn)							
	14		3276	1100	708	214	< 19	
	28		2444	650	233	< 11	< 11	
	56		865	531	61	< 8	< 8	
0.4	LAGRING (døgn)							
	14			1100	296	368	87	
	28			794	215	173	27	
	56			261	303	48	13	
0.0	LAGRING (døgn)							
	14			1184	229	354	177	48
	28			917	124	269	128	42
	56			828	324	179	74	23

Tabel 7.8b Klorid-diffusionskoefficienter i $\text{mm}^2/\text{År}$ for serie 2 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG THY FLYVEASKE.

DIFFUSIONS- KOEFFICIENT (mm ² /ÅR)		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
		MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)							
2.0	14		450	75	< 10			
	28	5703	152	28	< 10			
	56	2701	136	< 15	< 11			
1.6	LAGRING (døgn)							
	14		875	343	< 13	< 10		
	28	4666	577	< 15	< 17	< 10		
	56	2961	402	< 13	< 10	< 11		
1.2	LAGRING (døgn)							
	14		962	85	60	< 10		
	28		435	57	< 10	< 11		
	56		159	< 11	< 11	< 10		
0.8	LAGRING (døgn)							
	14		1974	211	< 14	78	29	
	28		1175	137	25	23	26	
	56		823	69	< 11	16	< 15	
0.4	LAGRING (døgn)							
	14			537	400	159	27	
	28			299	358	109	45	
	56			301	246	36	45	
0.0	LAGRING (døgn)							
	14			427	301	94	60	65
	28			474	233	48	46	30
	56			315	111	45	23	22

Tabel 7.8c

Klorid-diffusionskoefficienter i mm²/år for serie 3 fremstillet med SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

DIFFUSIONS- KOEFFICIENT (mm ² /ÅR)		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
		MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)							
2.0	14	2750	346	< 8	< 8			
	28	5499	< 12	< 8	< 8			
	56	30496	< 9	< 21	< 9			
1.6	LAGRING (døgn)							
	14	7777	129	< 19	< 8	< 8		
	28	73326	< 8	< 8	< 8	< 8		
	56	85547	< 9	< 13	< 9	< 8		
1.2	LAGRING (døgn)							
	14		364	62	< 11	< 9		
	28		< 24	41	< 10	< 13		
	56		< 9	< 24	< 21	< 10		
0.8	LAGRING (døgn)							
	14		579	169	< 11	51	< 8	
	28		309	41	< 9	< 16	< 8	
	56		24	< 12	< 9	< 10	< 9	
0.4	LAGRING (døgn)							
	14			305	72	27	17	
	28			154	92	< 9	11	
	56			84	30	< 10	< 9	
0.0	LAGRING (døgn)							
	14			427	301	94	60	65
	28			474	233	48	46	30
	56			315	111	45	23	22

Tabel 7.8d

Klorid-diffusionskoefficienter i mm²/år for serie 4 fremstillet med SLITE CEMENT OG THY FLYVEASKE.

DIFFUSIONS- KOEFFICIENT (CM ² /SEK) * 10 ⁻⁹		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
		MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)							
2.0	14	2441	1039	309	101			
	28	2441	996	291	100			
	56	2325	642	198	64			
1.6	LAGRING (døgn)							
	14	3756	763	287	132	39		
	28	4883	698	479	118	37		
	56	2872	610	273	62	18		
1.2	LAGRING (døgn)							
	14		977	488	149	50		
	28		888	279	69	29		
	56		1221	218	89	64		
0.8	LAGRING (døgn)							
	14		444	328	132	92	21	
	28		939	294	70	70	25	
	56		842	169	54	29	4	
0.4	LAGRING (døgn)							
	14			595	221	91	42	
	28			362	96	58	22	
	56			298	39	31	31	
0.0	LAGRING (døgn)							
	14			376	72	112	56	12
	28			291	39	85	41	13
	56			263	103	57	23	6

Tabel 7.9a Klorid-diffusionskoefficienter i cm²/sek for serie 1 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

DIFFUSIONS- KOEFFICIENT (CM ² /SEK) * 10 ⁻⁹		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
		MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)							
2.0	14	1575	857	307	125			
	28	3488	678	146	80			
	56	16276	173	201	7			
1.6	LAGRING (døgn)							
	14	2035	1085	175	107	30		
	28	1395	561	187	38	4		
	56	16276	904	122	54	< 3		
1.2	LAGRING (døgn)							
	14		1191	235	140	20		
	28		1078	186	76	< 3		
	56		3255	98	25	< 3		
0.8	LAGRING (døgn)							
	14		1039	349	222	68	< 6	
	28		775	206	74	< 4	< 3	
	56		274	168	19	< 3	< 2	
0.4	LAGRING (døgn)							
	14			349	94	114	20	
	28			252	68	55	8	
	56			83	96	15	4	
0.0	LAGRING (døgn)							
	14			376	72	112	56	12
	28			291	39	85	41	13
	56			263	103	57	23	6

Tabel 7.9b Klorid-diffusionskoefficienter i cm²/sek for serie 2 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG THY FLYVEASKE.

DIFFUSIONS- KOEFFICIENT (CM ² /SEK) * 10 ⁻⁹	F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)	C/V FORHOLD						
			0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
			MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL
2.8	14			143	24	< 3			
		28	1808	48	9	< 3			
		56	857	43	< 5	< 4			
1.6	14			277	109	< 4	< 3		
		28	1480	183	< 5	< 5	< 3		
		56	939	127	< 4	< 3	< 3		
1.2	14			305	27	19	< 6		
		28		138	18	< 6	< 3		
		56		58	< 4	< 4	< 3		
0.8	14			626	67	< 5	25	9	
		28		373	44	< 8	7	8	
		56		261	22	< 3	5	< 5	
0.4	14				170	127	50	8	
		28			95	114	35	14	
		56			96	78	12	14	
0.0	14				135	96	30	19	21
		28			150	74	15	15	10
		56			100	35	14	7	7

Tabel 7.9c Klorid-diffusionskoefficienter i cm²/sek for serie 3 fremstillet med SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

DIFFUSIONS- KOEFFICIENT (CM ² /SEK) * 10 ⁻⁹	F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)	C/V FORHOLD						
			0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
			MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL	MIDDEL
2.8	14		872	110	< 3	< 3			
		28	1744	< 4	< 3	< 3			
		56	12207	< 3	< 7	< 3			
1.6	14		2466	41	< 6	< 3	< 3		
		28	23251	< 3	< 3	< 3	< 3		
		56	27127	< 3	< 4	< 3	< 3		
1.2	14			115	20	< 3	< 3		
		28		< 7	13	< 3	< 4		
		56		< 3	< 8	< 7	< 3		
0.8	14			184	54	< 4	16	< 3	
		28		98	13	< 3	< 5	< 3	
		56		8	< 4	< 3	< 3	< 3	
0.4	14				97	23	9	5	
		28			49	29	< 3	4	
		56			27	9	< 3	< 3	
0.0	14				135	96	30	19	21
		28			150	74	15	15	10
		56			100	35	14	7	7

Tabel 7.9d Klorid-diffusionskoefficienter i cm²/sek for serie 4 fremstillet med SLITE CEMENT OG THY FLYVEASKE.

cement type	vandlagring	LIGNING(7.13)	korrelations- koefficient R^2
		A_5	
lavalkali	14 døgn	1211	0.92
-	28 døgn	892	0.92
-	56 døgn	889	0.96
slite	14 døgn	463	0.88
-	28 døgn	489	0.97
-	56 døgn	343	0.91

Tabel 7.10 Estimerede værdier for konstanten A_5 i ligning (7.13) med D_k i $\text{mm}^2/\text{år}$, samt de opnåede korrelationskoefficienter.

cement type	vandlagring	LIGNING (7.14)		korrelations- koefficient R^2
		A_2	E_2	
lavalkali	14 døgn	-1.71	8.46	0.75
-	28 døgn	-1.37	7.51	0.50
-	56 døgn	-1.99	8.65	0.94
slite	14 døgn	-1.27	7.29	0.87
-	28 døgn	-1.84	7.89	0.88
-	56 døgn	-1.74	7.35	0.89

Tabel 7.11 Estimerede værdier for konstanterne A_2 og E_2 i ligning (7.14) med D_k i $\text{mm}^2/\text{år}$, samt de opnåede korrelationskoefficienter.

cement type	aske type	vand-lagring	LIGNING (7.7)			korrelations-koefficient R^2
			A_2	K_d	E_2	
lavalkali	asnæs	14 døgn	-1.71	-0.09	8.46	0.89
-	-	28 døgn	-1.37	-0.27	7.51	0.76
-	-	56 døgn	-1.99	<u>0.07</u>	8.65	0.86
lavalkali	thy ^a	14 døgn	-1.71	<u>-0.01</u>	8.46	0.84
-	-	28 døgn	-1.37	<u>-0.006</u>	7.51	0.58
-	-	56 døgn	-1.99	<u>0.23</u>	8.65	0.60
slite ^b	asnæs	14 døgn	-1.27	0.71	7.29	0.56
-	-	28 døgn	-1.84	0.53	7.89	0.63
-	-	56 døgn	-1.74	0.56	7.35	0.58
slite ^c	thy	14 døgn	-1.27	0.97	7.29	0.45
-	-	28 døgn	-1.84	0.87	7.89	0.40
-	-	56 døgn	-1.74	0.73	7.35	0.24

Tabel 7.12 Estimerede værdier for konstanten K_d i $\text{mm}^2/\text{år}$ i ligning (7.7), og de opnåede korrelationskoefficienter for modellen, for fastholdte A_2 og E_2 værdier.

cement type	aske type	vand-lagring	LIGNING (7.7)			korrelations-koefficient R^2
			A_6	K_d	E_6	
lavalkali	asnæs	14 døgn	-2.15	<u>0.04</u>	9.35	0.93
-	-	28 døgn	-2.37	<u>0.03</u>	9.39	0.91
-	-	56 døgn	-2.72	<u>0.10</u>	9.70	0.93
lavalkali	thy ^a	14 døgn	-2.45	<u>0.14</u>	9.78	0.89
-	-	28 døgn	-3.17	0.22	10.4	0.81
-	-	56 døgn	-3.93	0.23	11.4	0.79
slite ^b	asnæs	14 døgn	-2.57	0.54	9.53	0.69
-	-	28 døgn	-2.93	0.50	9.75	0.69
-	-	56 døgn	-2.71	0.49	8.88	0.62
slite ^c	thy	14 døgn	-3.03	0.53	9.75	0.67
-	-	28 døgn	-2.85	0.55	8.93	0.41
-	-	56 døgn	-2.48	<u>0.34</u>	7.52	0.25

- a) For serien med Lavalkali cement og Thy flyveaske er der efter 28 døgn vandlagring benyttet minimums-tider for 6 jem fordelt på 3 blandinger, og 12 jem fordelt på 4 blandinger efter 56 døgn vandlagring.
- b) Ved 14 døgn vandlagring er der benyttet minimumstider for 10 jem fordelt på 5 blandinger. Der er ligeledes benyttet de pr. 1. maj fundne minimums-initieringstider for 12 jem fordelt på 6 blandinger efter 28 døgn, og 25 jem fordelt på 10 blandinger efter 56 døgn.
- c) For Slite cement og Thy flyveaske resterer der endnu pr. 1. maj 1988 23 ammeringsjem fordelt på 9 blandinger efter 14 døgn. For 28 døgn vedkommende er der endnu 34 jem i 14 blandinger ud af de i alt 27 blandinger der indgår i analysen, hvor der endnu ikke er registreret nogen kloridinitiering. Efter 56 døgn resterer der tilsvarende 42 jem i 17 blandinger.

Tabel 7.13 Estimerede værdier for konstanterne A , E og K_d i ligning (7.7), og de opnåede korrelationskoefficienter for modellen uden fastholdte konstanter, for K_d i $\text{mm}^2/\text{år}$.

cement type	aske type	vand- lagring	LIGNING (7.15)				R ²
			A ₂	B ₂	D ₂	E ₂	
lavalkali	asnæs	14 døgn	-1.71	0.57	-0.37	8.46	0.92
-	-	28 døgn	-1.37	1.31	-0.86	7.51	0.91
-	-	56 døgn	-1.99	0.61	-0.67	8.65	0.94
lavalkali	thy ^a	14 døgn	-1.71	0.63	-0.61	8.46	0.90
-	-	28 døgn	-1.37	1.62	-1.63	7.51	0.86
-	-	56 døgn	-1.99	1.62	-2.10	8.65	0.91
slite ^b	asnæs	14 døgn	-1.27	0.83	-1.51	7.29	0.79
-	-	28 døgn	-1.84	<u>0.23</u>	-1.22	7.89	0.81
-	-	56 døgn	-1.74	<u>0.15</u>	-1.14	7.35	0.74
slite ^c	thy	14 døgn	-1.27	0.61	-1.85	7.29	0.84
-	-	28 døgn	-1.84	<u>-0.26</u>	-1.35	7.89	0.53
-	-	56 døgn	-1.74	0.24	-1.53	7.35	0.40

- a) For serien med Lavalkali cement og Thy flyveaske er der efter 28 døgn vandlagring benyttet minimums-tider for 6 jern fordelt på 3 blandinger, og 12 jern fordelt på 4 blandinger efter 56 døgn vandlagring.
- b) Ved 14 døgn vandlagring er der benyttet minimumstider for 10 jern fordelt på 5 blandinger. Der er ligeledes benyttet de pr. 1. maj fundne minimums-initieringstider for 12 jern fordelt på 6 blandinger efter 28 døgn, og 25 jern fordelt på 10 blandinger efter 56 døgn.
- c) For Slite cement og Thy flyveaske resterer der endnu pr. 1. maj 1988 23 armeringsjern fordelt på 9 blandinger efter 14 døgn. For 28 døgn vedkommende er der endnu 34 jern i 14 blandinger ud af de i alt 27 blandinger der indgår i analysen, hvor der endnu ikke er registreret nogen kloridinitiering. Efter 56 døgn resterer der tilsvarende 42 jern i 17 blandinger.

Tabel 7.14 Estimerede værdier for konstanterne i ligning (7.15) og de opnåede korrelationskoefficienter for D_k beregnet i $\text{mm}^2/\text{år}$. Konstanterne A_2 og E_2 er i analysen fastholdt på de tidligere fundne værdier for diffusion i almindelig beton uden tilsætning af flyveaske.

TYPE	1. serie	3. serie
Cement	Lavalkali	Slite
Flyveaske	Asnæs	Asnæs

Tabel 8.1 Forsøgsplan for vandindtrængning.

CEMENT-LAVAL ASKE-ASN							
OBS	BLANDING		CEMENT	ASKE	SAND	STEN	TILSÆTN
	c/v	f/v	KG	KG	KG	KG	%
1	0.2	1.6	36	288	621	1153	0.0
2	0.6	0.8	108	144	712	1162	0.0
3	0.6	1.2	108	216	648	1152	1.2
4	0.6	2.0	108	360	543	1083	3.9
5	1.0	0.0	200	0	863	1054	0.0
6	1.0	0.4	180	72	741	1159	0.0
7	1.0	0.8	180	144	657	1169	0.0
8	1.0	1.2	175	210	537	1234	0.0
9	1.0	1.6	180	288	557	1082	2.8
10	1.0	2.0	180	360	517	1049	8.0
11	1.4	0.0	273	0	766	1183	0.0
12	1.4	0.4	252	72	685	1167	0.0
13	1.4	0.8	252	144	613	1139	0.0
14	1.4	1.2	252	216	566	1099	3.2
15	1.4	1.6	252	288	525	1066	7.5
16	1.4	2.0	252	360	477	1014	10.3
17	1.8	0.0	324	0	685	1171	0.0
18	1.8	0.4	324	72	645	1147	0.0
19	1.8	0.8	324	144	580	1125	2.9
20	1.8	1.2	324	216	534	1084	6.1
21	1.8	1.6	333	296	491	996	10.0
22	2.2	0.0	429	0	625	1112	0.0
23	2.2	0.4	396	72	601	1117	3.0
24	2.2	0.8	396	144	526	1093	5.6
25	2.6	0.0	507	0	590	1095	3.0

CEMENT-SLITE ASKE-ASN							
OBS	BLANDING		CEMENT	ASKE	SAND	STEN	TILSÆTN
	c/v	f/v	KG	KG	KG	KG	%
26	0.2	2.0	36	360	630	1169	3.4
27	0.6	0.8	105	141	696	1180	0.0
28	0.6	1.2	105	211	619	1164	2.8
29	0.6	1.6	105	281	569	1139	1.3
30	0.6	2.0	105	352	522	1093	0.7
31	1.0	0.0	200	0	842	1055	0.0
32	1.0	0.4	180	72	721	1166	0.0
33	1.0	0.8	176	141	640	1168	0.0
34	1.0	1.2	186	223	576	1138	0.0
35	1.0	1.6	180	288	501	1097	4.3
36	1.0	2.0	176	352	498	1067	8.7
37	1.4	0.0	273	0	735	1121	0.0
38	1.4	0.4	246	70	660	1174	0.0
39	1.4	0.8	246	141	600	1159	0.0
40	1.4	1.2	252	216	544	1110	3.6
41	1.4	1.6	246	282	506	1076	6.0
42	1.4	2.0	252	360	465	1017	12.8
43	1.8	0.0	351	0	661	1130	0.0
44	1.8	0.4	317	70	617	1167	0.0
45	1.8	0.8	324	144	558	1122	4.4
46	1.8	1.2	317	211	514	1093	10.1
47	1.8	1.6	317	282	482	1043	12.3
48	2.2	0.0	422	0	607	1123	0.0
49	2.2	0.4	396	72	572	1135	4.3
50	2.2	0.8	387	141	531	1102	7.3
51	2.6	0.0	507	0	565	1096	0.7

Tabel 8.2 Blanderecepter per m³ med tilslag i ssd-tilstand for betoner til vandindtrængningsforsøg.

(Tilsætningsmiddel måles i % af cement + flyveaskemængde).

		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
F/V FORHOLD								
2.0	VAND (kg)	180	176	176	180			
	PLAST (%)	0.34	0.87	0.87	1.28			
	SLUMP (mm)	90	110	90	100			
	LUFT (%)	1.90	1.90	2.10	2.60			
	DENSITET	2240	2249	1695	2220			
1.6	VAND (kg)		176	180	176	176		
	PLAST (%)		0.13	0.43	0.60	1.23		
	SLUMP (mm)		60	85	100	110		
	LUFT (%)		2.00	1.90	1.50	2.90		
	DENSITET		2260	2280	2283	2271		
1.2	VAND (kg)		176	186	180	176		
	PLAST (%)		0.28	0.00	0.36	1.01		
	SLUMP (mm)		90	60	70	110		
	LUFT (%)		1.50	2.00	2.20	1.60		
	DENSITET		2305	2308	2311	2314		
0.8	VAND (kg)		176	176	176	180	176	
	PLAST (%)		0.00	0.00	0.00	0.44	0.73	
	SLUMP (mm)		70	60	55	90	90	
	LUFT (%)		1.80	1.40	1.60	2.00	1.50	
	DENSITET		2328	2357	2337	2337	2334	
0.4	VAND (kg)			180	176	176	180	
	PLAST (%)			0.00	0.00	0.00	0.43	
	SLUMP (mm)			55	60	50	70	
	LUFT (%)			1.70	1.20	1.40	1.40	
	DENSITET			2331	2371	2359	2348	
0.0	VAND (kg)			200	195	195	192	195
	PLAST (%)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
	SLUMP (mm)			70	85	90	60	60
	LUFT (%)			3.60	3.40	1.70	2.10	2.00
	DENSITET			2240	2314	2362	2402	2368

Tabel 8.3a Egenskaber for frisk beton fremstillet med SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE til vandindtrængningsforsøg.

		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
F/V FORHOLD								
2.0	VAND (kg)		180	180	180			
	PLAST (%)		0.39	0.80	1.03			
	SLUMP (mm)		90	95	160			
	LUFT (%)		1.80	1.70	2.90			
	DENSITET		2246	2271	2234			
1.6	VAND (kg)	180		180	180	185		
	PLAST (%)	0.00		0.28	0.75	1.00		
	SLUMP (mm)	80		80	80	70		
	LUFT (%)	1.30		2.10	1.50	2.50		
	DENSITET	2271		2280	2283	2263		
1.2	VAND (kg)		180	175	180	180		
	PLAST (%)		0.12	0.00	0.32	0.61		
	SLUMP (mm)		90	50	100	105		
	LUFT (%)		1.50		1.90	1.40		
	DENSITET		2277		2308	2308		
0.8	VAND (kg)		180	180	180	180	180	
	PLAST (%)		0.00	0.00	0.00	0.29	0.56	
	SLUMP (mm)		60	65	50	80	90	
	LUFT (%)		1.40	1.60	1.50	1.30	1.30	
	DENSITET		2320	2303	2332	2351	2337	
0.4	VAND (kg)			180	180	180	180	
	PLAST (%)			0.00	0.00	0.00	0.30	
	SLUMP (mm)			50	60	65	85	
	LUFT (%)			1.40	1.40	1.20	1.70	
	DENSITET			2347	2339	2382	2359	
0.0	VAND (kg)			200	195	180	195	195
	PLAST (%)			0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
	SLUMP (mm)			50	85	65	95	100
	LUFT (%)			1.80	2.40	1.50	1.20	
	DENSITET			2294	2314	2359	2368	2371

Tabel 8.3b Egenskaber for frisk beton fremstillet med LAVALKALICEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE til vandindtrængningsforsøg.

MIDDELTRYKSTYRKE OG SPREDNING (MPa)		C/V FORHOLD													
		0.2		0.6		1		1.4		1.8		2.2		2.6	
		STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)														
2.0	28			6.7	0.6	17.1	0.9	29.2	3.3						
	56			8.1	0.4	25.2	0.7	37.5	4.1						
1.6	LAGRING (døgn)														
	28	1.0	0.1			20.2	1.1	31.0	2.9	38.5	2.3				
	56					25.0	1.5	46.6	1.1	45.1	4.1				
1.2	LAGRING (døgn)														
	28			5.2	0.2	18.3	0.9	31.1	2.5	45.0	2.2				
	56			7.5	0.2	25.4	1.5	39.4	3.2	55.4	3.8				
0.8	LAGRING (døgn)														
	28			6.0	0.3	16.0	1.2	31.7	0.7	45.0	2.7	53.7	1.6		
	56			8.6	0.5	23.4	1.6	42.4	1.4			60.1	4.3		
0.4	LAGRING (døgn)														
	28					14.5	0.4	29.8	1.3	43.6	1.4	44.1	4.7		
	56					20.7	0.6	37.2	1.9	56.6	1.5	57.0	3.2		
0.0	LAGRING (døgn)														
	28							22.2	0.9	36.8	1.8	52.0	0.9	53.2	5.7
	56					15.3	0.8	26.1	1.5	46.2	2.0	60.5	3.5		

Tabel 8.4a Trykstyrken af beton til vandindtrængningsforsøg fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

MIDDELTRYKSTYRKE OG SPREDNING (MPa)		C/V FORHOLD													
		0.2		0.6		1		1.4		1.8		2.2		2.6	
		STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN	STYRKE	SPREDN
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)														
2.0	28	1.8	0.0	12.8	0.6	26.6	2.0	39.0	1.5						
1.6	LAGRING (døgn)														
	28			7.2	0.5	22.6	0.8	38.1	2.9	46.2	0.5				
1.2	LAGRING (døgn)														
	28			9.1	1.2	21.1	0.6	34.8	1.2	44.6	3.9				
0.8	LAGRING (døgn)														
	28			8.1	0.3	18.8	0.8	28.0	0.8	39.9	3.6	53.1	2.9		
0.4	LAGRING (døgn)														
	28					16.3	0.4	26.3	2.4	38.5	1.3	41.9	4.0		
0.0	LAGRING (døgn)														
	28					13.8	0.7	18.6	1.2	39.1	0.8	51.0	1.3	61.6	1.3

Tabel 8.4b Trykstyrken af beton til vandindtrængningsforsøg fremstillet med SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

INDTRÆNGNINGS- DYBDE OG SPREDNING I DØGN (cm)		C/V FORHOLD													
		0.2		0.6		1		1.4		1.8		2.2		2.6	
		DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)														
2.0	28			12.0	0.00	2.0	0.07	1.7	0.15						
	56			12.0	0.00	1.6	0.07	1.6	0.28						
1.6	28	12.0	0.00			2.2	0.21	2.3	0.14	1.1	0.06				
	56	12.0	0.00			3.0	0.07	2.0	1.13	0.6	0.25				
1.2	28			12.0	0.00	3.4	0.85	2.4	0.78	0.2	0.00				
	56			12.0	0.00	5.0	1.06	1.5	0.00	0.8	0.07				
0.8	28			12.0	0.00	5.2	0.64	1.7	0.35	1.6	1.04	1.7	1.56		
	56			12.0	0.00	2.9	0.28	1.1	0.42	1.3	0.10	0.8	0.14		
0.4	28					6.4	0.85	2.4	0.64	1.8	0.00	0.7	0.15		
	56					3.9	1.98	1.7	0.42	1.9	0.71	1.6	1.25		
0.0	28					6.3	0.35	3.2	0.58	1.9	0.53	2.9	1.27	0.1	0.00
	56					6.6	0.85	2.0	0.00	1.3	0.00	1.6	0.78	0.1	0.00

Tabel 8.5a Vandindtrængningsdybder for beton fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

INDTRÆNGNINGS- DYBDE OG SPREDNING I DØGN (cm)		C/V FORHOLD													
		0.2		0.6		1		1.4		1.8		2.2		2.6	
		DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN	DYBDE	SPREDN
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)														
2.0	28	12.0	0.00	3.5	0.17	1.4	0.29	0.2	0.00						
1.6	28			8.4	0.66	1.3	0.06	0.3	0.00	0.7	0.06				
	56														
1.2	28			7.6	0.78	3.3	0.26	1.2	0.12	0.3	0.00				
	56														
0.8	28			10.6	0.96	4.8	1.04	2.1	0.32	1.6	0.36	0.9	0.10		
	56														
0.4	28					6.4	0.40	3.3	0.38	1.7	0.49	1.1	0.06		
	56														
0.0	28					8.8	0.10	4.3	0.81	1.8	0.15	1.3	0.15	0.2	0.00
	56														

Tabel 8.5b Vandindtrængningsdybder for beton fremstillet med SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

SERIE	CEMENT TYPE	EGENSKAB	R^2	P > F
				AFD.
SERIE 1	LAVALKALI	SÆTMÅL	0.47	0.72
		LUFT	0.32	0.59
		DENSITET	0.89	0.19
SERIE 3	SLITE	SÆTMÅL	0.43	0.38
		LUFT	0.64	0.16
		DENSITET	0.37	0.46

Tabel 8.6 Hovedresultaterne af sammenligningen mellem de friske betoners egenskaber i vandindtrængningsforsøget og styrke- og kloridforsøget.

SERIE	CEMENT TYPE	ALDER døgn	R^2	P > F
				AFD.
SERIE 1	LAVALKALI	28	0.96	0.82
SERIE 3	SLITE	28	0.96	0.35
		56	0.94	0.38

Tabel 8.7 Hovedresultaterne af sammenligningen mellem betonernes styrke i styrke- og kloridindtrængningsforsøget og de nye betoners styrke i vandindtrængningsforsøget.

MODEL	R^2	P>F
		CEMENTTYPE
DYBDE28	0.71	0.27

Tabel 8.8 Hovedresultatet af den statistiske analyse af cementtypens indflydelse på de målte vandindtrængningsdybder.

MODEL	R^2	P>F
		LAGRINGSTID
DYBDE	0.67	0.61

Tabel 8.9 Hovedresultaterne af den statiske analyse af startvandlagringstidernes indflydelse på vandindtrængningsdybden.

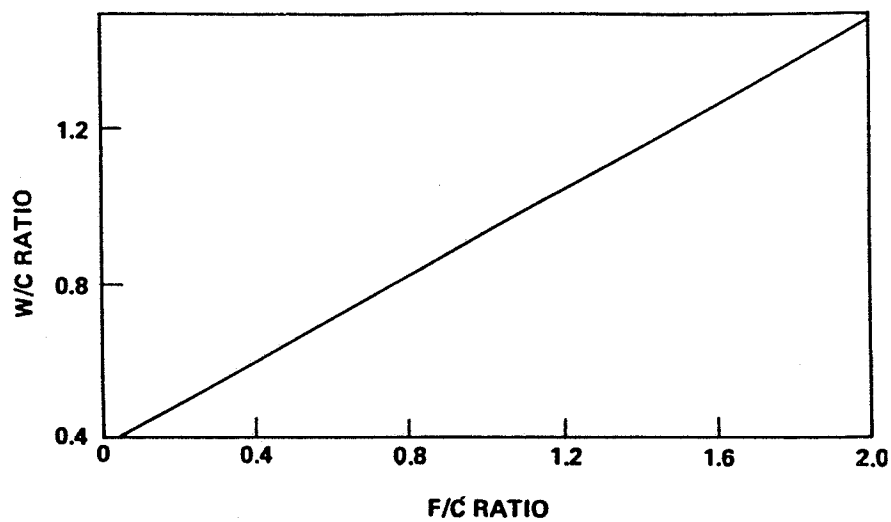
PERMEABILITETS- KOEFFICIENT (m/sek) $\cdot 10^{-12}$		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
		PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)							
2.0	28		> 757.5	22.1	14.7			
	56		> 757.5	14.3	13.5			
1.6	LAGRING (døgn)							
	28		> 757.5	26.6	27.8	6.0		
	56		> 757.5	48.9	21.0	2.1		
1.2	LAGRING (døgn)							
	28		> 757.5	60.8	29.1	0.2		
	56		> 757.5	120.9	11.8	3.0		
0.8	LAGRING (døgn)							
	28		> 757.5	139.5	16.1	13.5	15.2	
	56		> 757.5	44.2	6.4	8.2	3.4	
0.4	LAGRING (døgn)							
	28			215.5	29.1	17.0	2.0	
	56			80.0	15.2	19.0	13.0	
0.0	LAGRING (døgn)							
	28			212.1	53.9	18.6	44.2	0.1
	56			229.1	21.0	8.2	12.6	0.1

Tabel 8.10a Permeabilitetskoefficienter i m/sek $\cdot 10^{-12}$ for serie 3 fremstillet med LAVALKALI CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

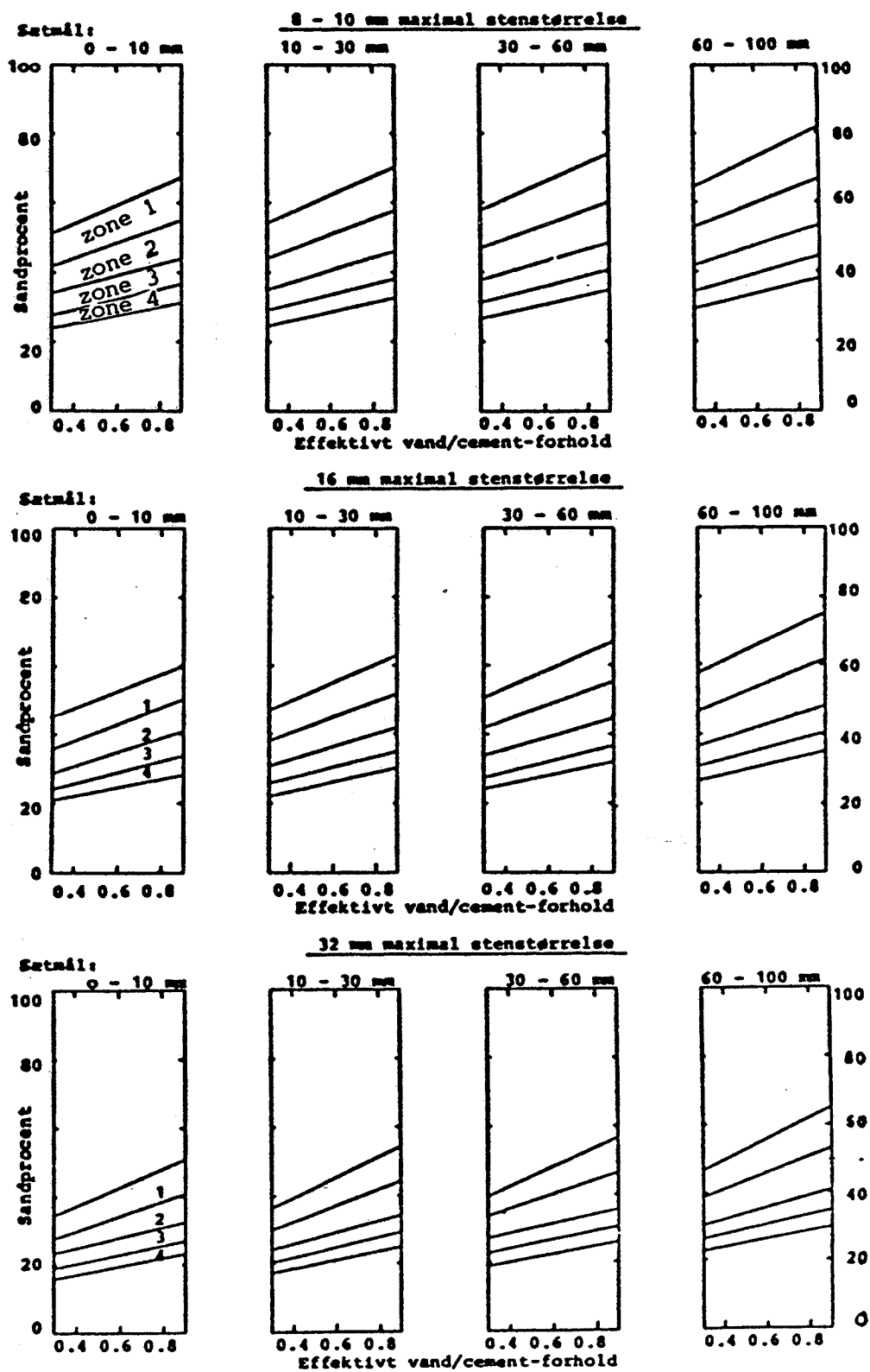
PERMEABILITETS- KOEFFICIENT (m/sek) $\cdot 10^{-12}$		C/V FORHOLD						
		0.2	0.6	1	1.4	1.8	2.2	2.6
		PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET	PERMEA- BILITET
F/V FORHOLD	LAGRING (døgn)							
2.0	28	> 757.5	64.4	9.9	0.2			
1.6	LAGRING (døgn)							
	28		371.2	9.3	0.5	2.4		
1.2	LAGRING (døgn)							
	28		301.5	57.3	7.2	0.5		
0.8	LAGRING (døgn)							
	28		591.1	122.7	23.9	13.5	4.3	
0.4	LAGRING (døgn)							
	28			215.5	50.3	15.7	6.0	
0.0	LAGRING (døgn)							
	28			407.4	98.6	17.6	9.3	0.2

Tabel 8.10b Permeabilitetskoefficienter i m/sek $\cdot 10^{-12}$ for serie 3 fremstillet med SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE.

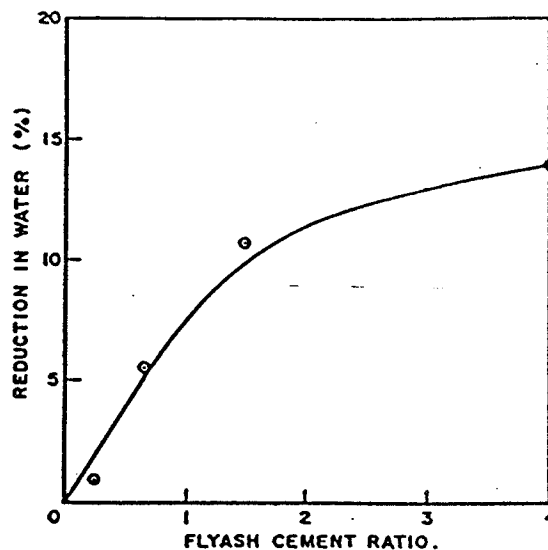
13. FIGURER



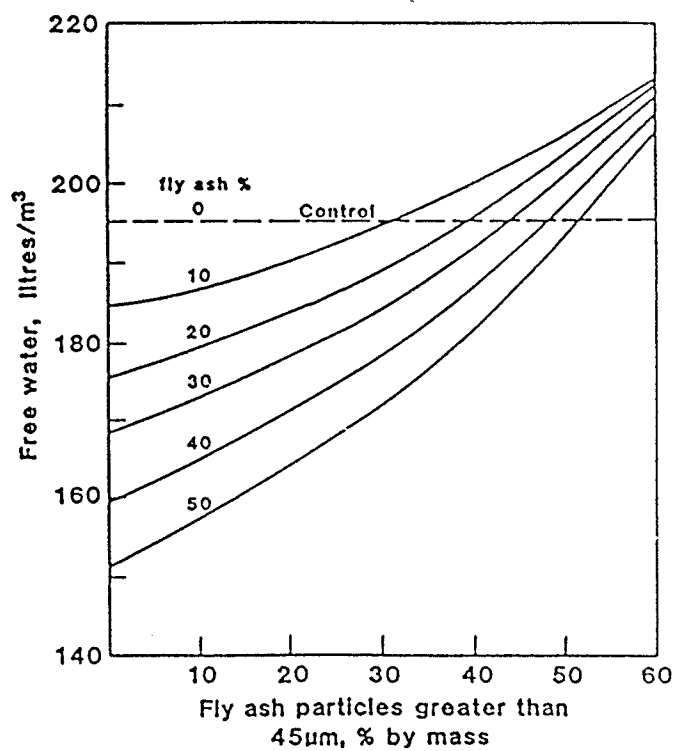
Figur 6.1 Forholdet mellem optimalt vand-cement (W/C) og flyveaske-cement (F/C) forhold i almindelige betoner og flyveaskebetoner (fra ref. 24).



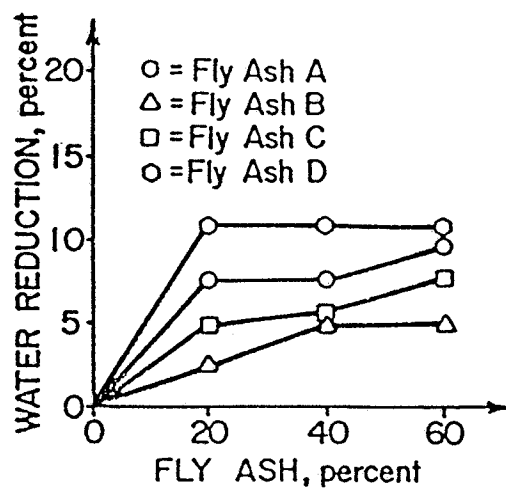
Figur 6.2. Anbefalede sand-andele af det samlede tilslag (fra ref. 28).



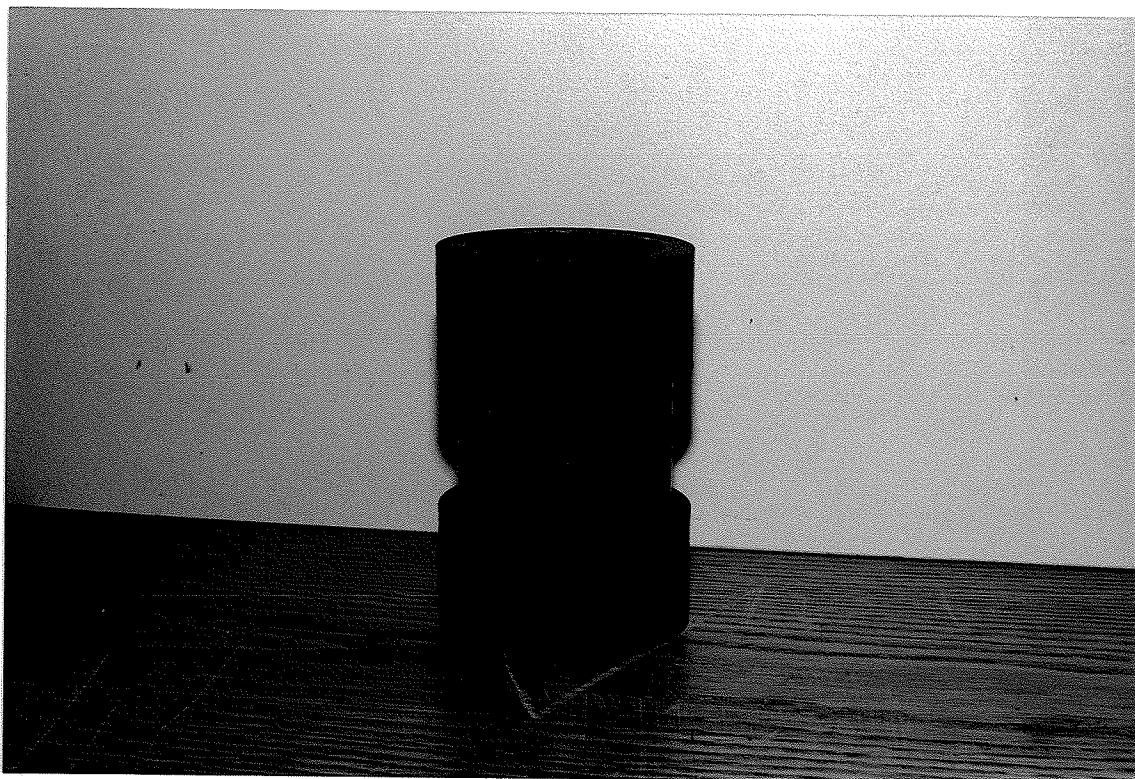
Figur 6.3 Reduktion i betonens vandbehov som funktion af mængden tilsat flyveaske i forhold til mængden tilsat cement (fra 34).



Figur 6.4 Indflydelse af grove flyveaskepartikler på vandbehovet for samme bearbejdelighed af betonen (fra ref. 35).



Figur 6.5 Indflydelse af mængden tilsat flyveaske på betons vandbehov for samme bearbejdelighed (fra ref. 36).



Figur 6.6 Støbeforme af standard PVC vandør.

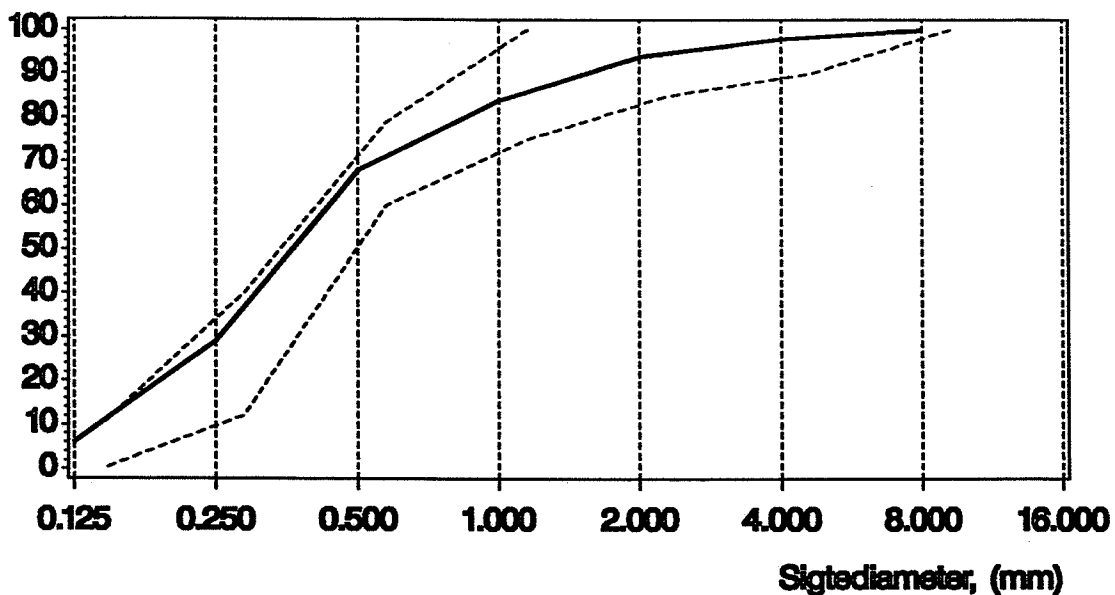


Figur 6.7 Fastspænding af støbeforme.



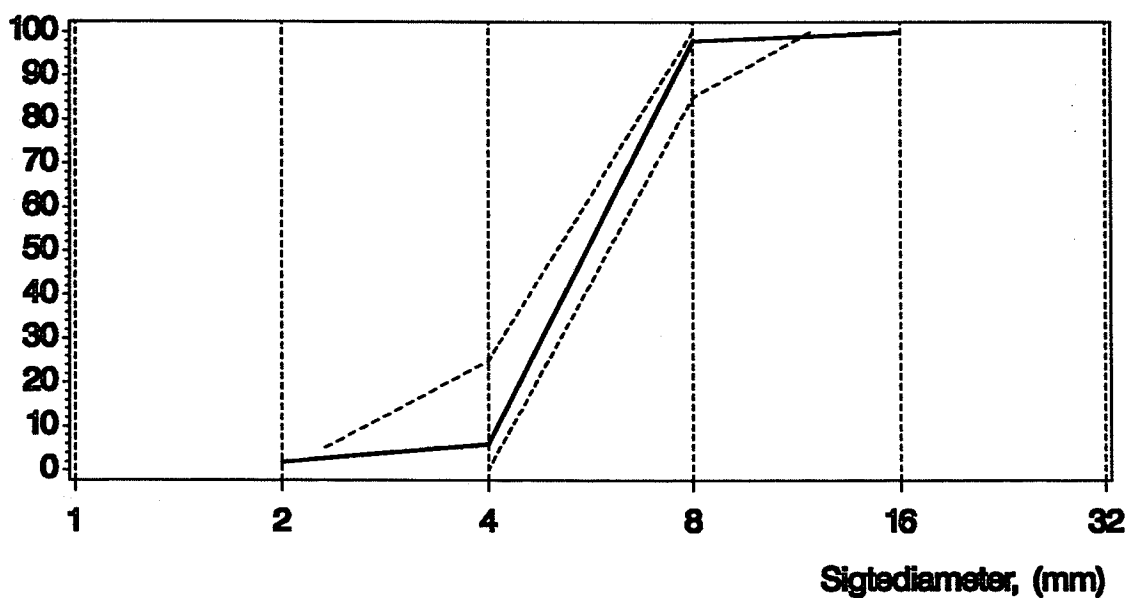
Figur 6.8 Afformningsapparat.

Gennemfald i %



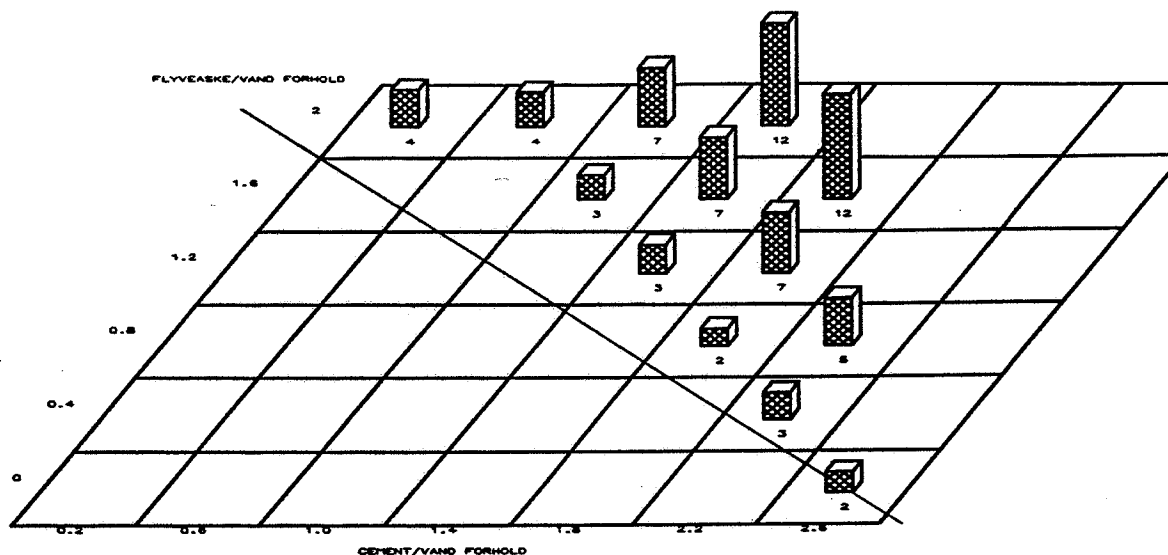
Figur 6.9 Graderingskurve for Voervadsbro sand og grænsekurver for zone 3 sand i henhold til BS 882-1973.

Gennemfald i %



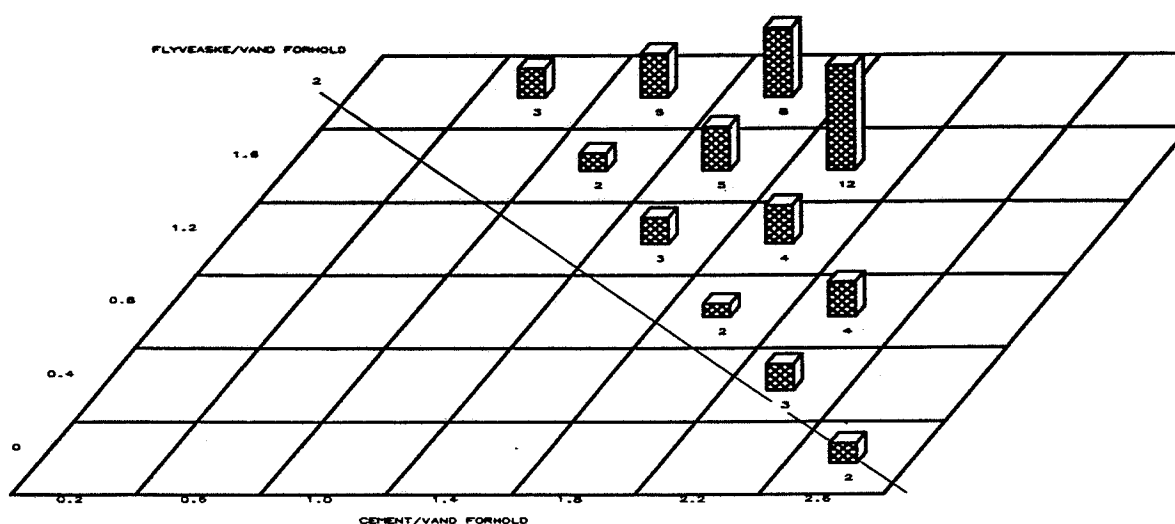
Figur 6.10 Graderingskurve for Rønne Granitskærver og grænsekurver for 8 mm sten tilpasset fra BS 882-1973.

LAVALKALI CEMENT OG ASVES FLYVEASKE



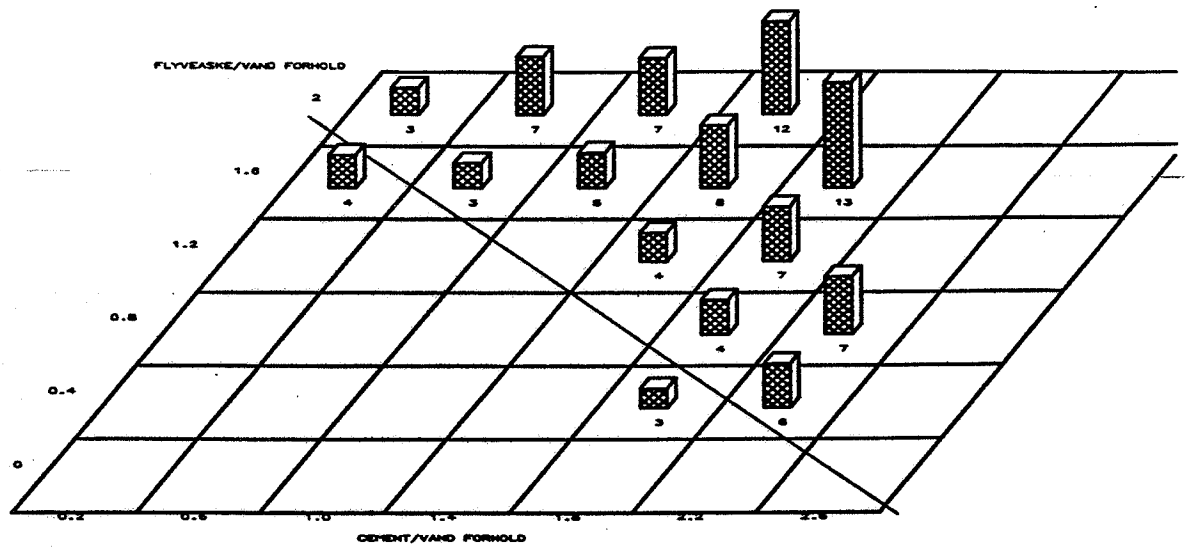
Figur 6.11 a Mængde tilsat superplastificeringsstof i betoner i serie 1 (mængden tilsat superplastificeringsstof er angivet med numeriske værdier i hvert rhombe, som promille af den samlede cement plus flyveaskemængde. I figuren er indlagt den hypotetiske grænselinie for brug af superplastificeringsstof.)

LAVALKALI CEMENT OG THY FLYVEASKE



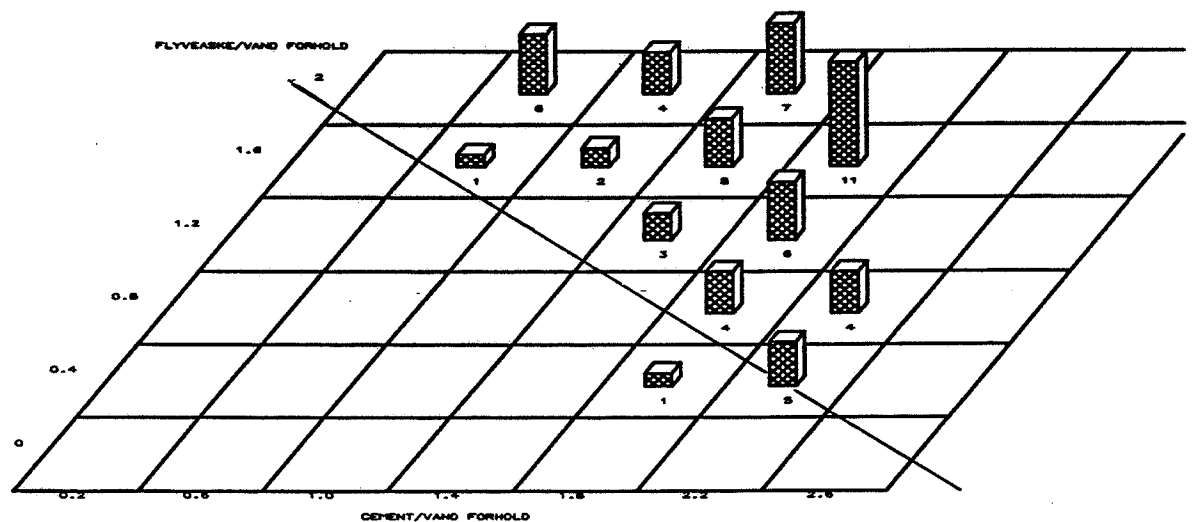
Figur 6.11 b Mængde tilsat superplastificeringsstof i betoner i serie 2 (mængden tilsat superplastificeringsstof er angivet med numeriske værdier i hvert rhombe, som promille af den samlede cement plus flyveaskemængde. I figuren er indlagt den hypotetiske grænselinie for brug af superplastificeringsstof.)

SLITE CEMENT OG ASKES FLYVEASKE.



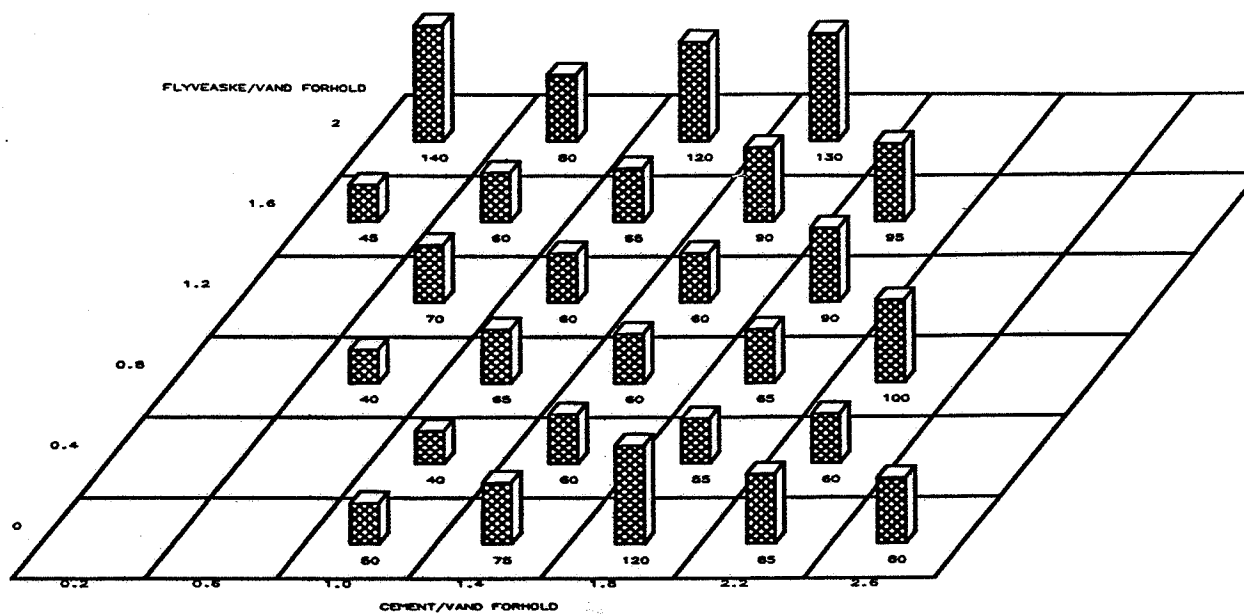
Figur 6.11 c Mængde tilsat superplastificeringsstof i betoner i serie 3 (mængden tilsat superplastificeringsstof er angivet med numeriske værdier i hvert rhombe, som promille af den samlede cement plus flyveaskemængde. I figuren er indlagt den hypotetiske grænselinie for brug af superplastificeringsstof.)

SLITE CEMENT OG THY FLYVEASKE.



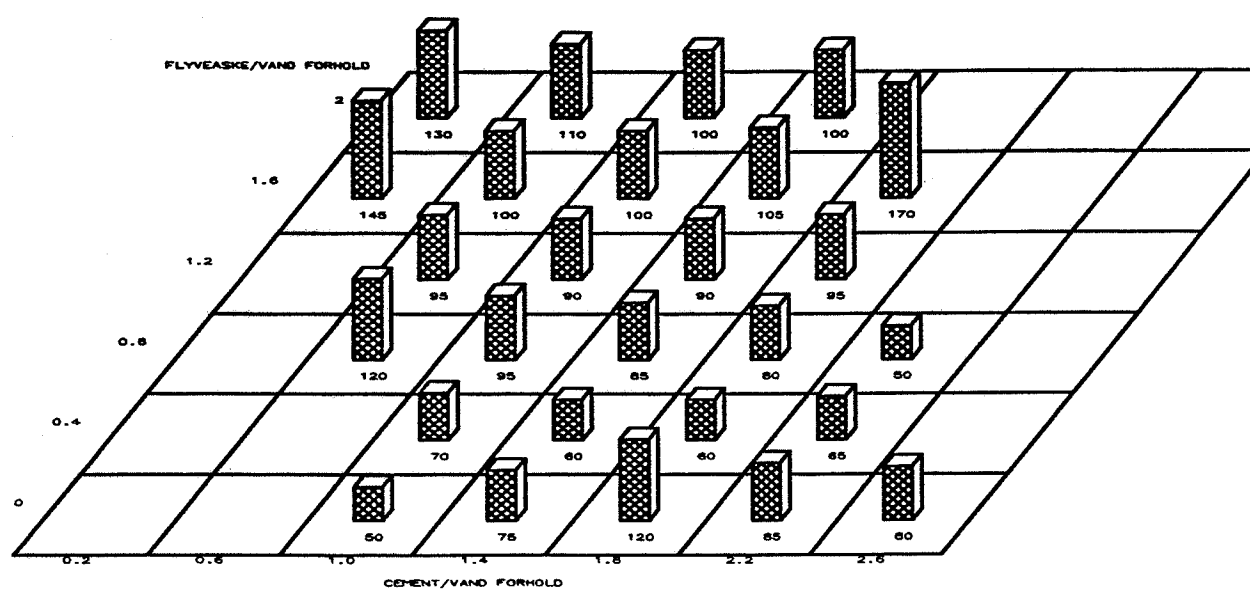
Figur 6.11 d Mængde tilsat superplastificeringsstof i betoner i serie 4 (mængden tilsat superplastificeringsstof er angivet med numeriske værdier i hvert rhombe, som promille af den samlede cement plus flyveaskemængde. I figuren er indlagt den hypotetiske grænselinie for brug af superplastificeringsstof.)

LAVALKALI CEMENT OG ASVES FLYVEASKE



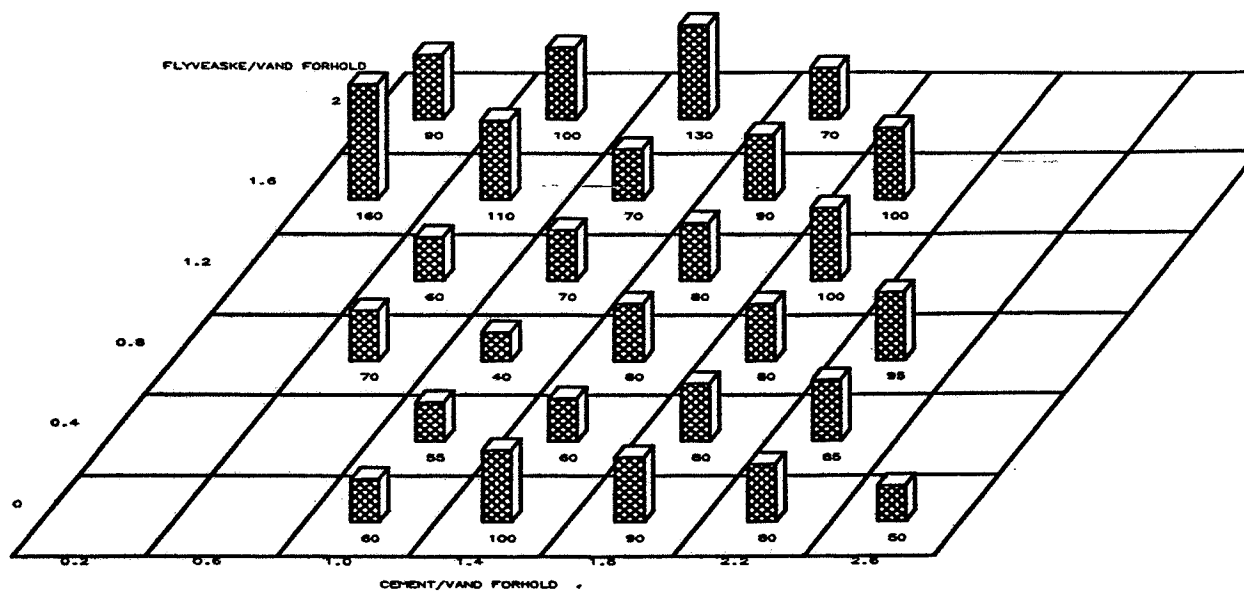
Figur 6.12 a Opnået sætmål i mm for betoner i serie 1.

LAVALKALI CEMENT OG THY FLYVEASKE



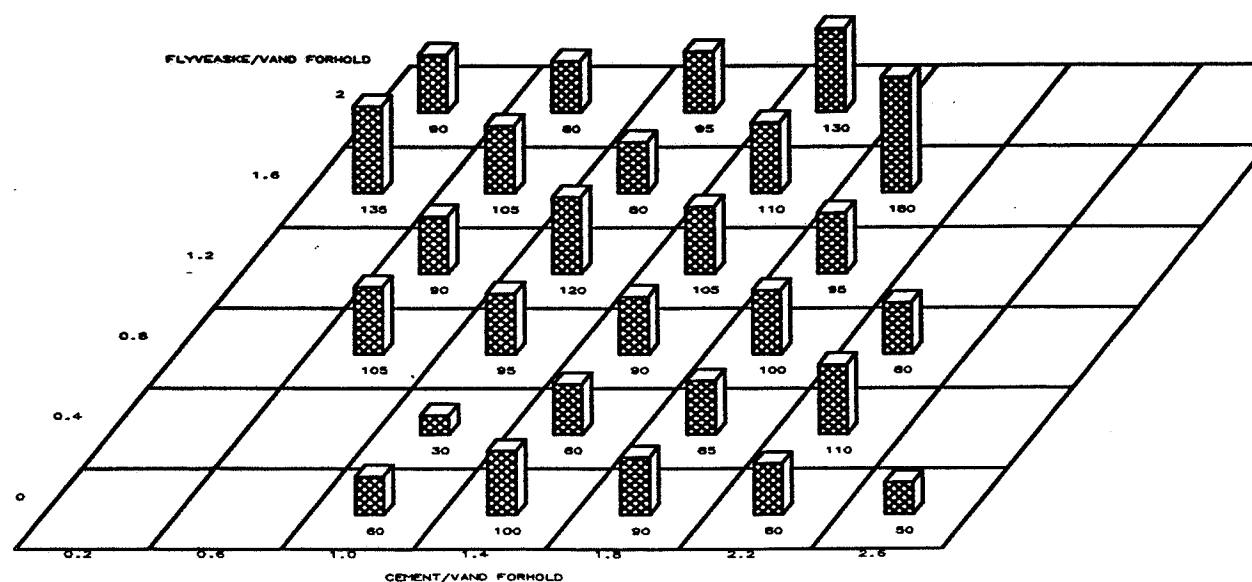
Figur 6.12 b Opnået sætmål i mm for betoner i serie 2.

SLITE CEMENT OG ASEMES FLYVEASKE

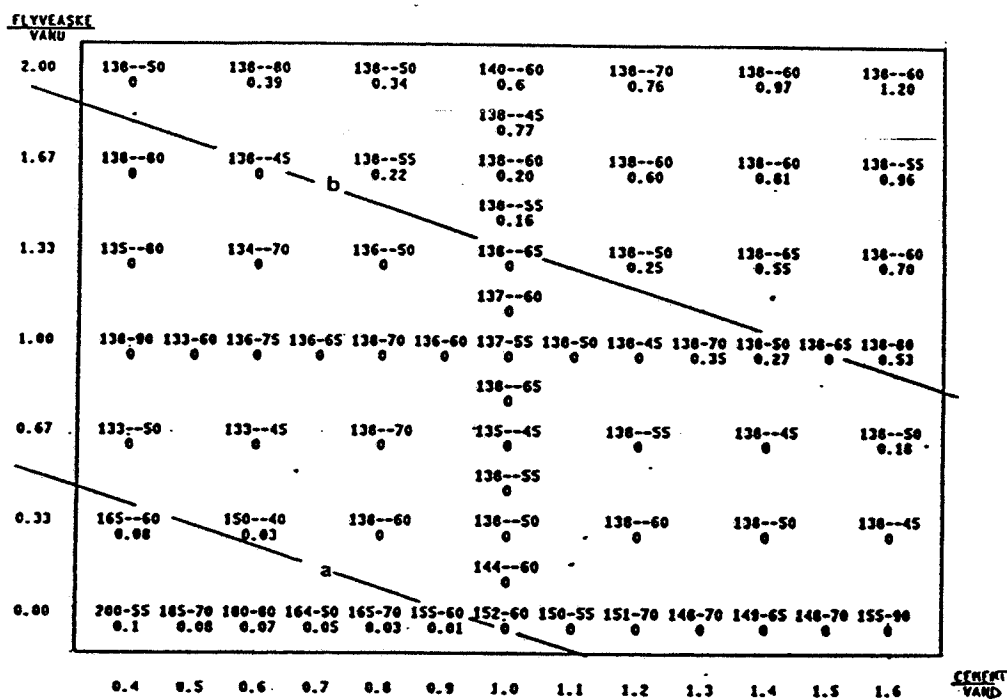


Figur 6.12 c Opnået sætmål i mm for betoner i serie 3.

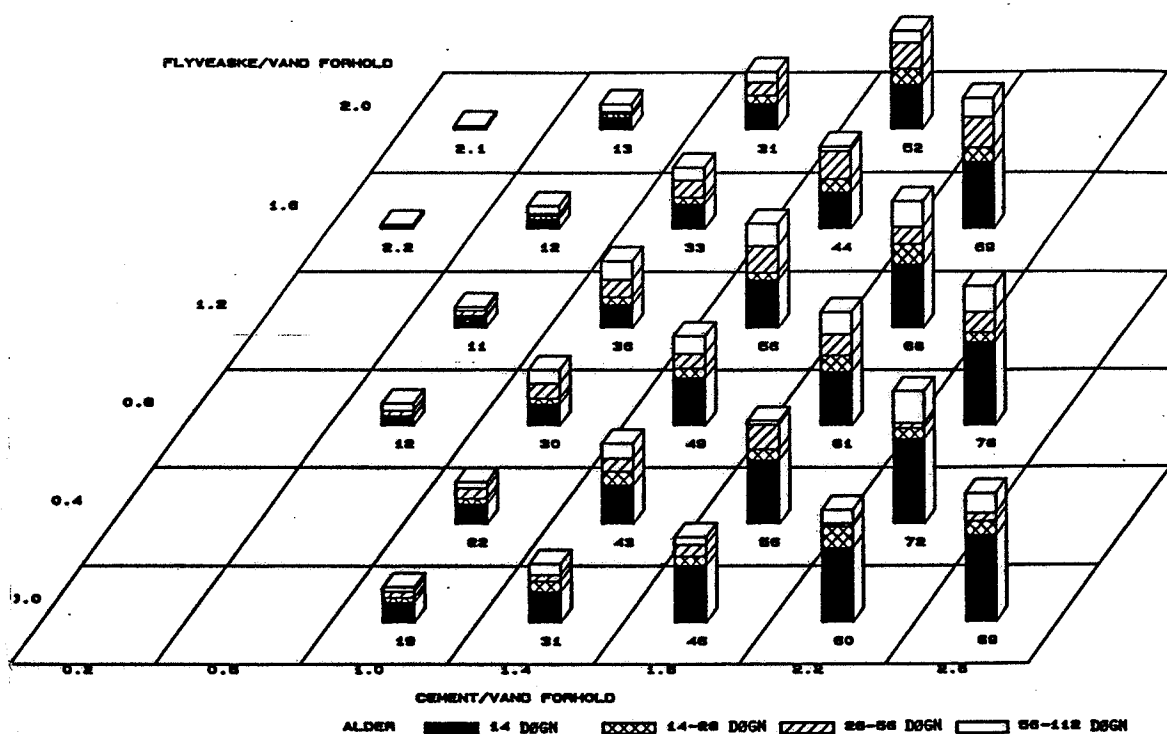
SLITE CEMENT OG THY FLYVEASKE



Figur 6.12 d Opnået sætmål i mm for betoner i serie 4.

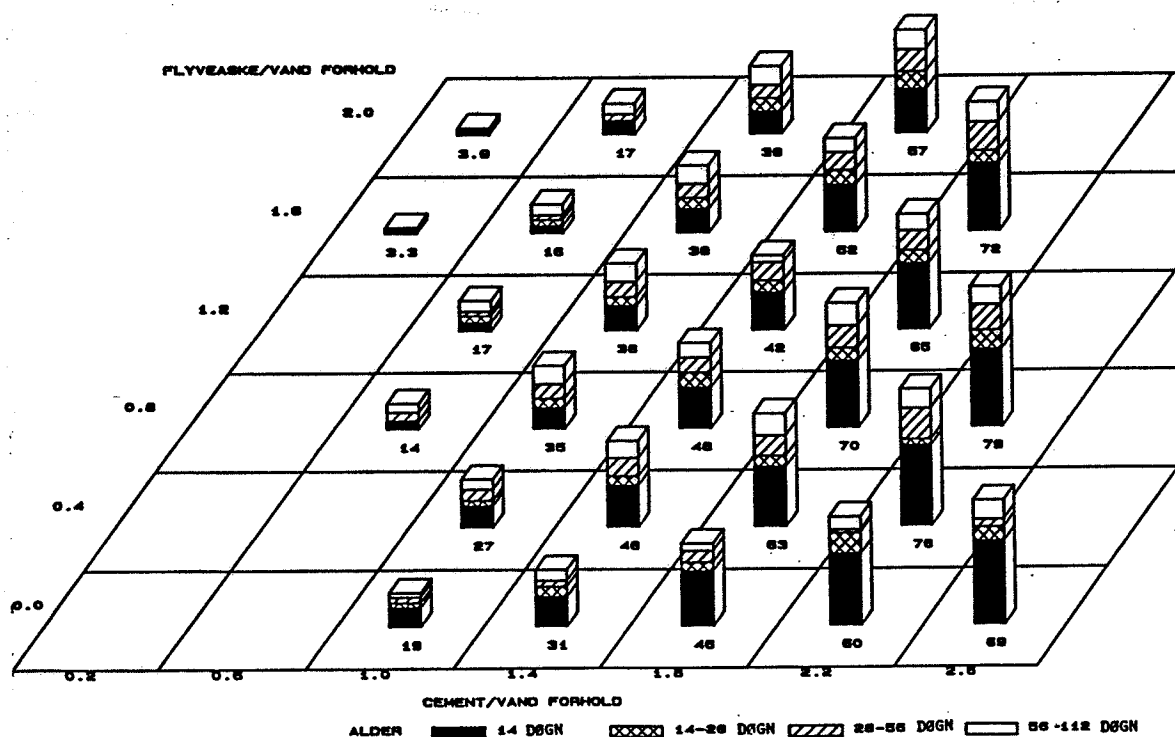


Figur 6.13 Anvendt frit vandindhold i kg per m³, opnået konsistens i mm, og dosering af tilsætningsstof i vægt % af cement + flyveaskemængden i specialserie fremstillet med Hvid cement og Asnæs flyveaske. Signaturen i hvert punkt angiver vægtmængderne $\frac{\text{frit vand} - \text{setmål}}{\text{tilsætningsstof}}$ (fra ref. 25).



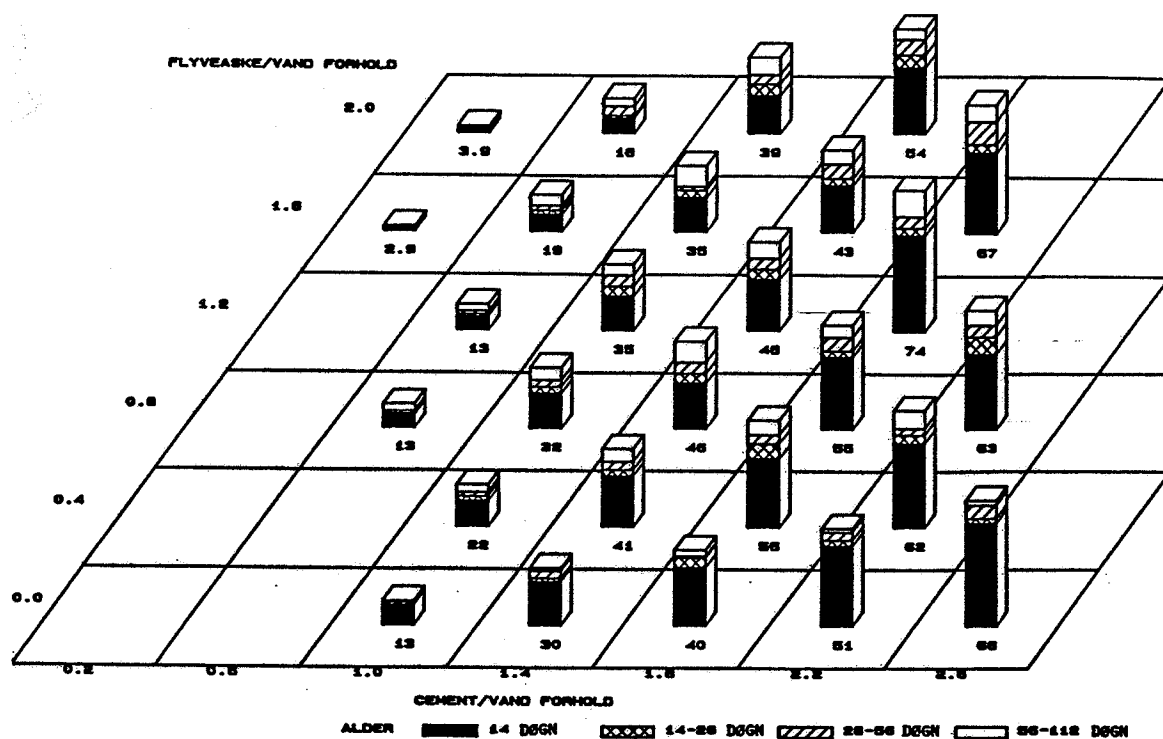
LAVALKALI CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE

Figur 6.14 a Trykstyrken efter 14 - 28 - 56 og 112 døgn's vandlagring for betoner i serie 1 (den numeriske værdi i hver rhombe angiver trykstyrken i MPa efter 112 døgn).



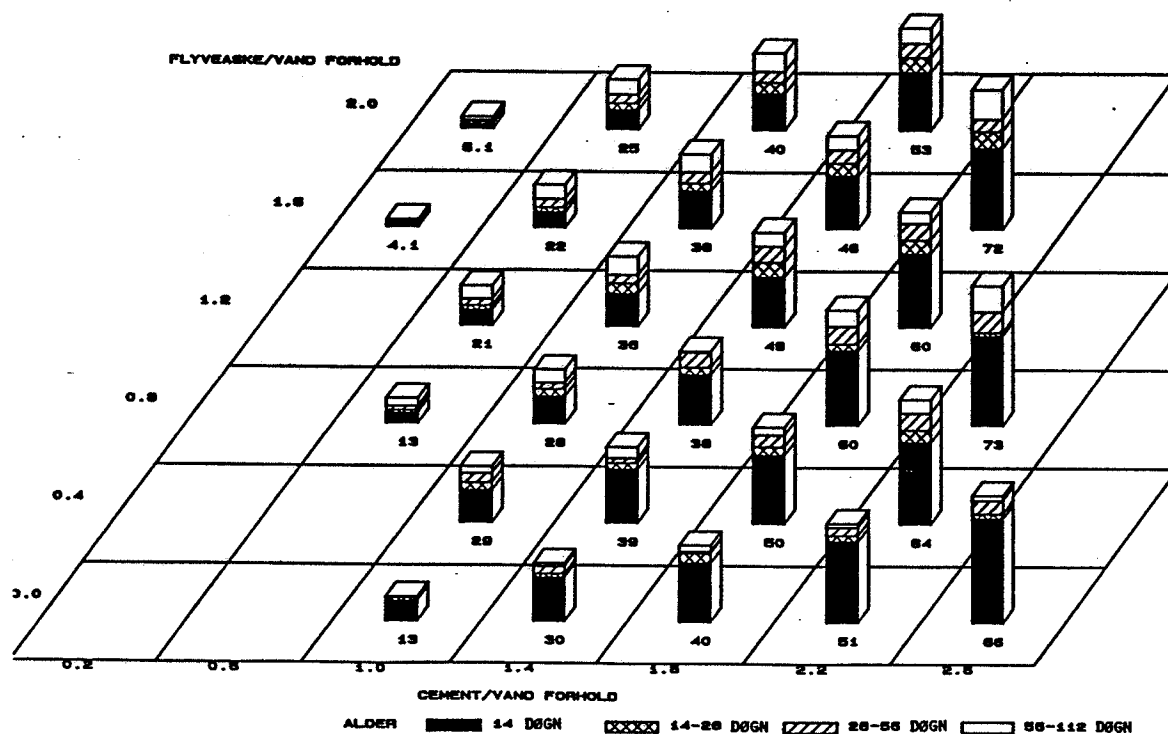
LAVALKALI CEMENT OG THY FLYVEASKE

Figur 6.14 b Trykstyrken efter 14 - 28 - 56 og 112 døgn's vandlagring for betoner i serie 2 (den numeriske værdi i hver rhombe angiver trykstyrken i MPa efter 112 døgn).



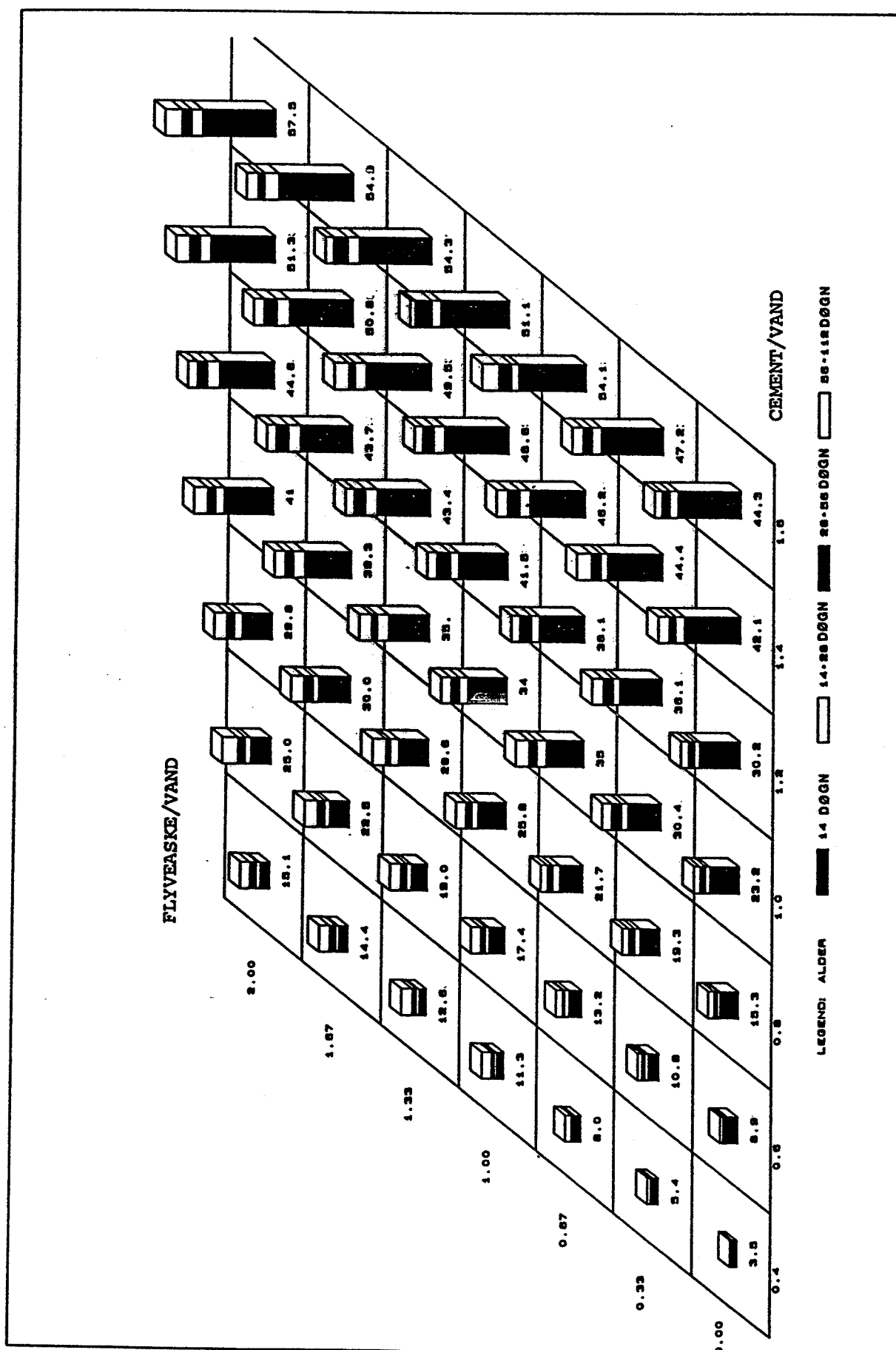
SLITE CEMENT OG ASNÆS FLYVEASKE

Figur 6.14 c Trykstyrken efter 14 - 28 - 56 og 112 døgn's vandlagring for betoner i serie 3 (den numeriske værdi i hver rhombe angiver trykstyrken i MPa efter 112 døgn).



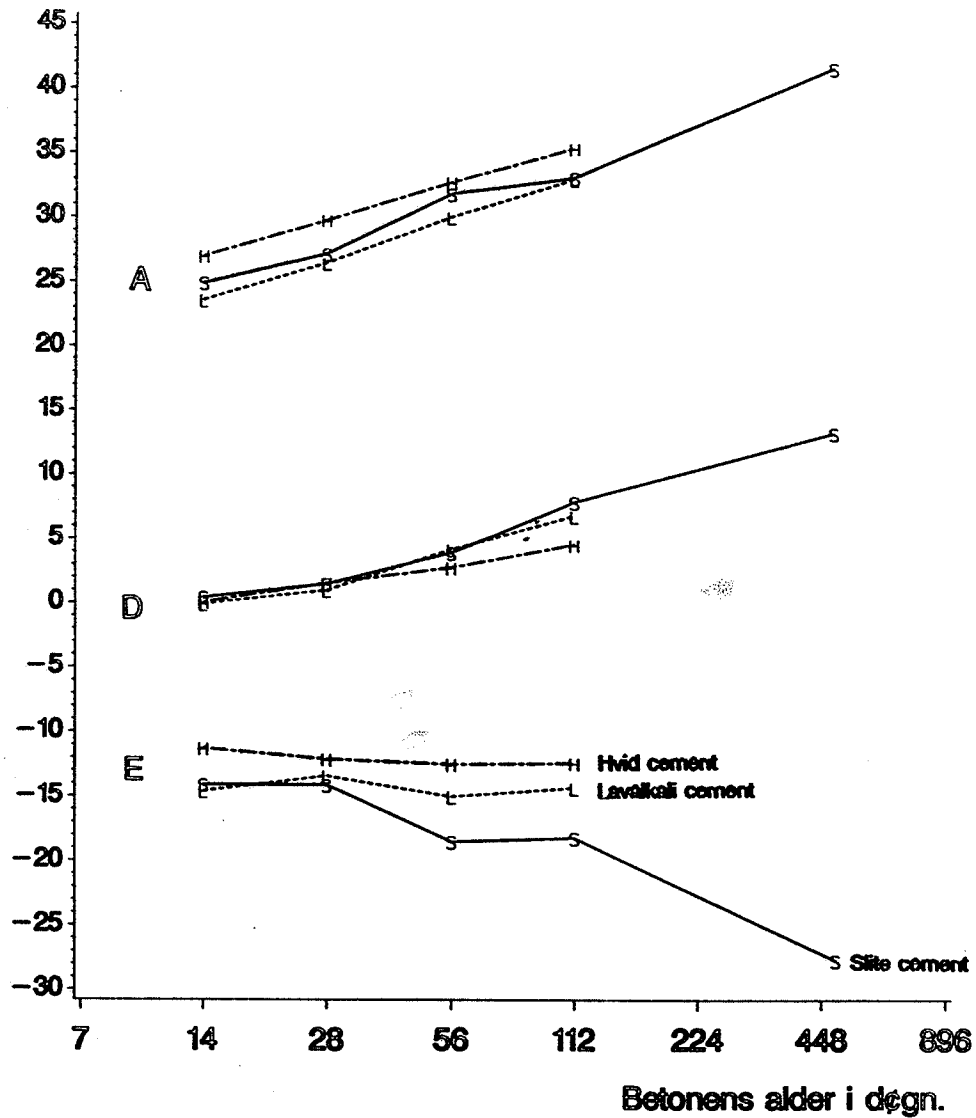
SLITE CEMENT OG THY FLYVEASKE

Figur 6.14 d Trykstyrken efter 14 - 28 - 56 og 112 døgn's vandlagring for betoner i serie 4 (den numeriske værdi i hver rhombe angiver trykstyrken i MPa efter 112 døgn).

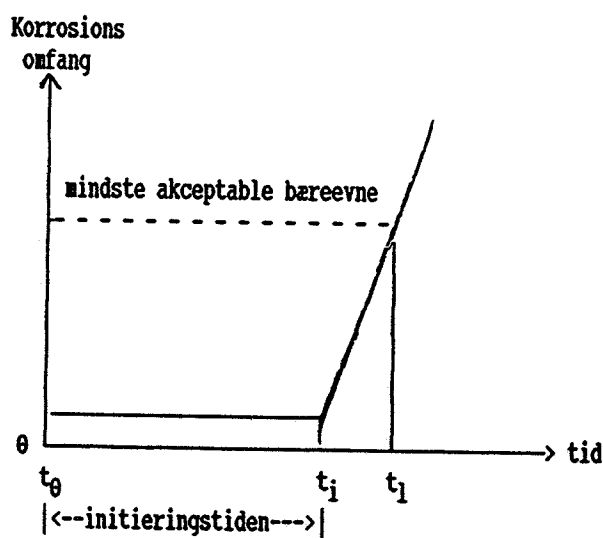


Figur 6.14 e Trykstyrken efter 14 - 28 - 56 og 112 døgns vandlagring for betoner i specialserie nr. 5 som blev fremslillet på et tidligere tidspunkt med Hvid Portland Cement og Asnæs flyveaske (den numeriske værdi i hver rhombe angiver trykstyrken i MPa efter 112 døgns) (fra ref. 25).

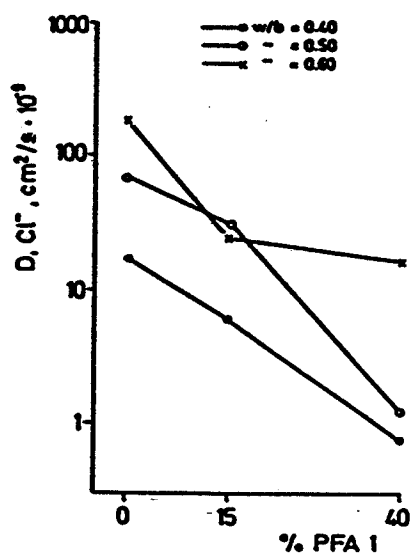
Værdien af konstanterne
A, D og E



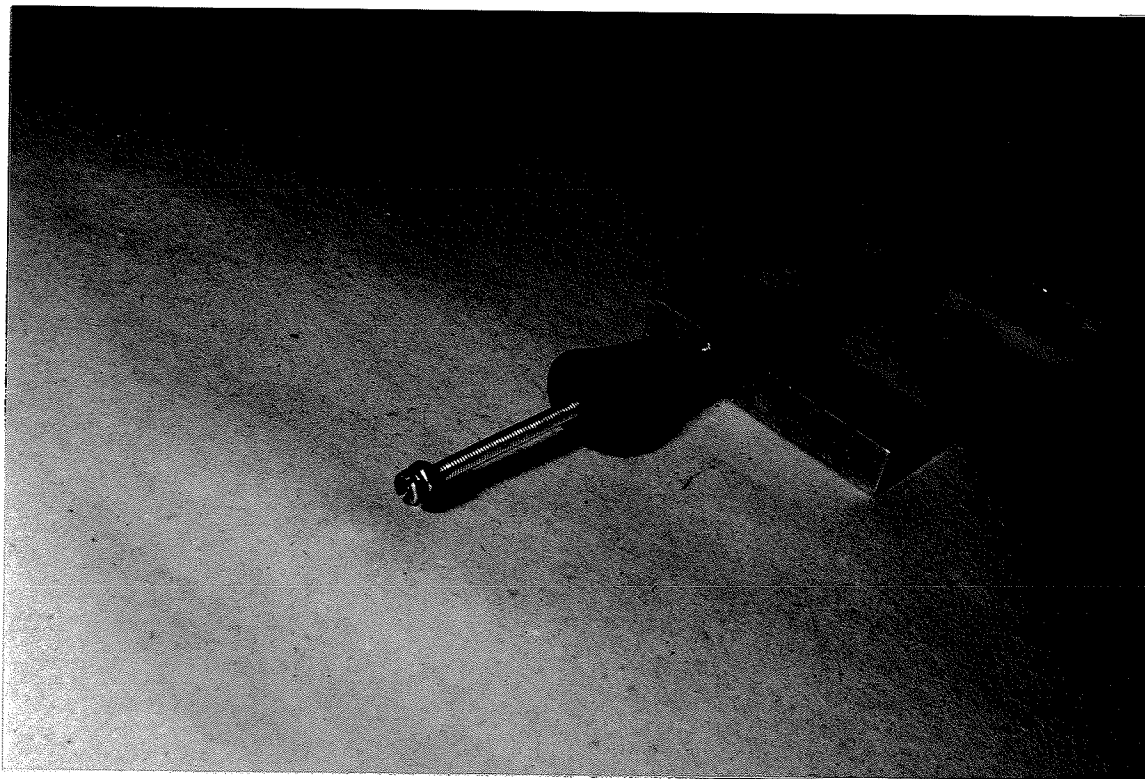
Figur 6.15 Værdien af konstanterne A, D og E i Bolomeys udvidede styrkeligning (6.7) for flyveaskebeton, som funktion af betonens alder og den anvendte cementtype.



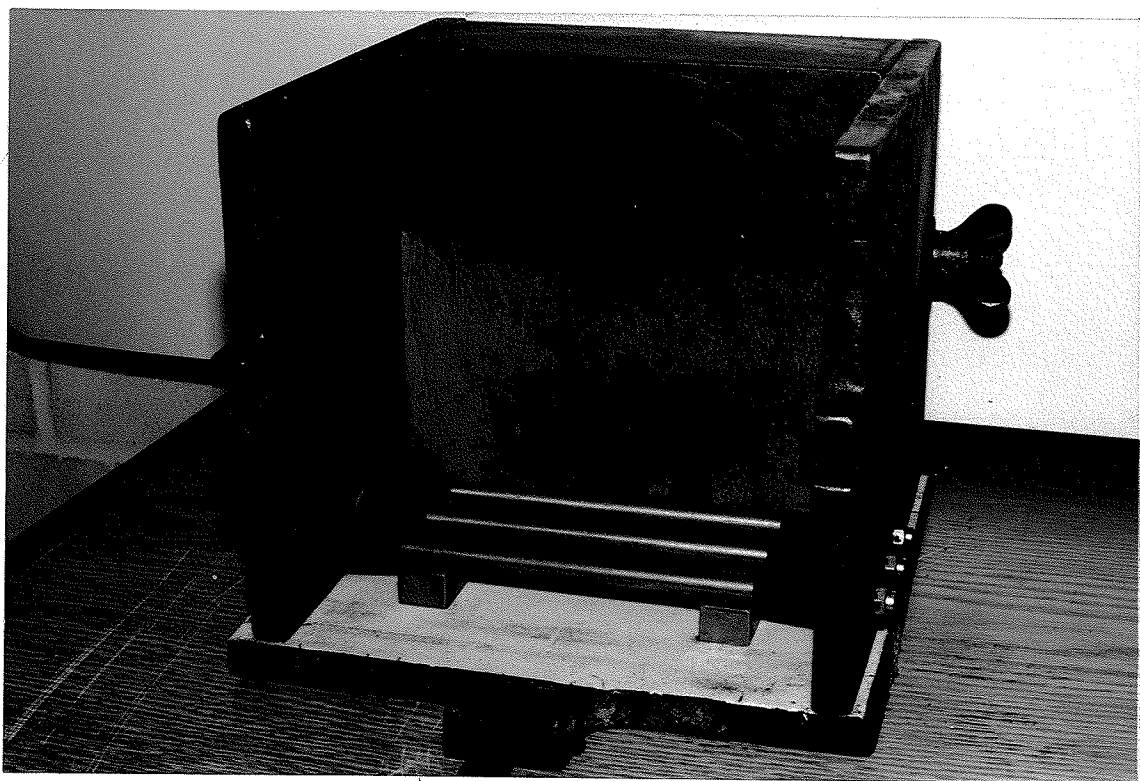
Figur 7.1 Principielt korrosionsforløb for indstøbte armeringsjern i urevnet beton. Tutti [44].



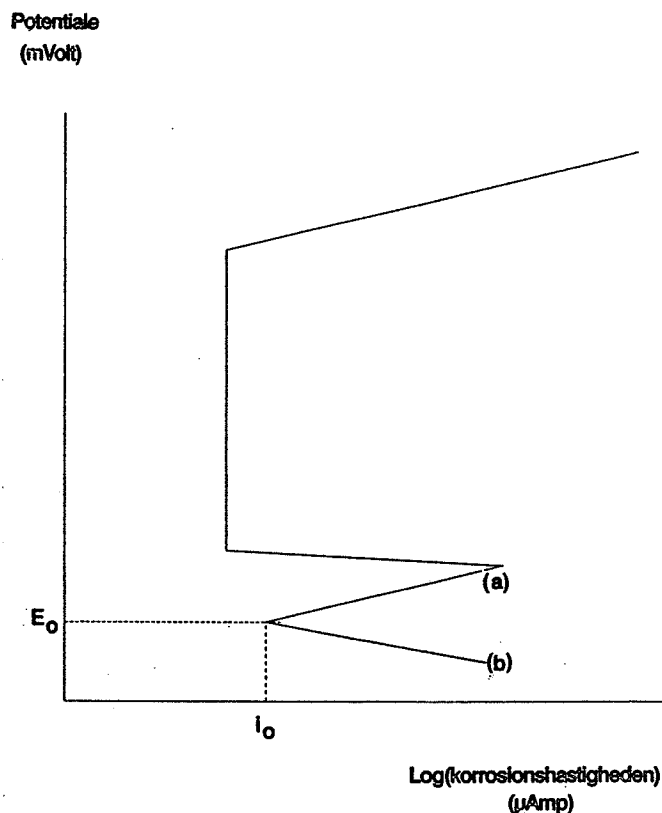
Figur 7.2 Diffusionskoefficienter for Cl^- i cementpasta som funktion af pastaernes flyveaskeindhold (Byfors [65])



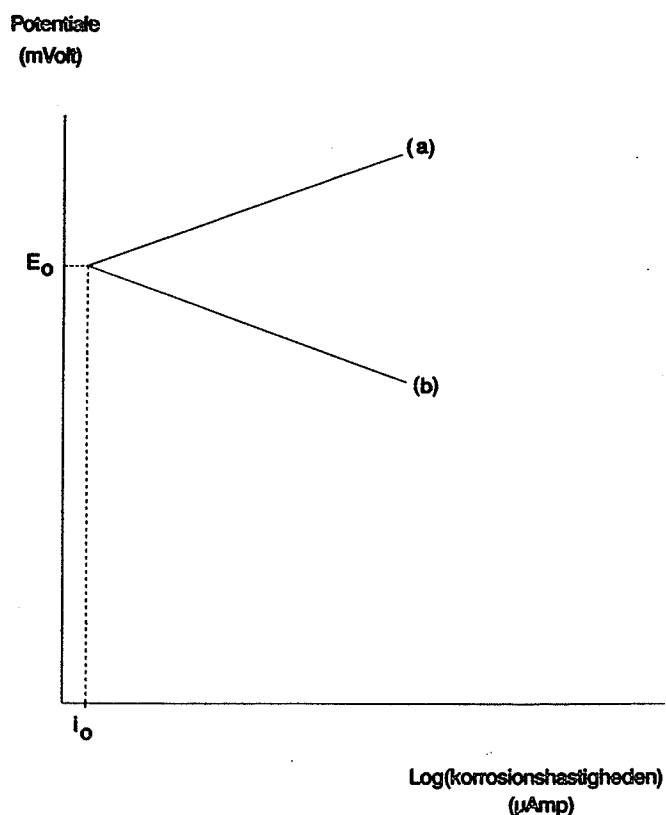
Figur 7.3 Plastikmuffe til fastholdelse af armering under udstøbningen.



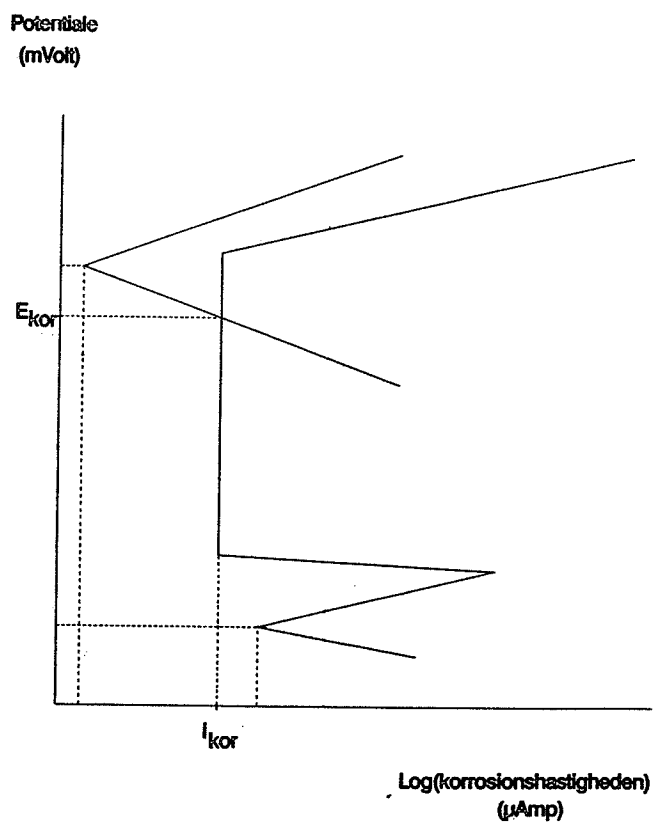
Figur 7.4 Støbeform til kloridindtrængningsforsøg.



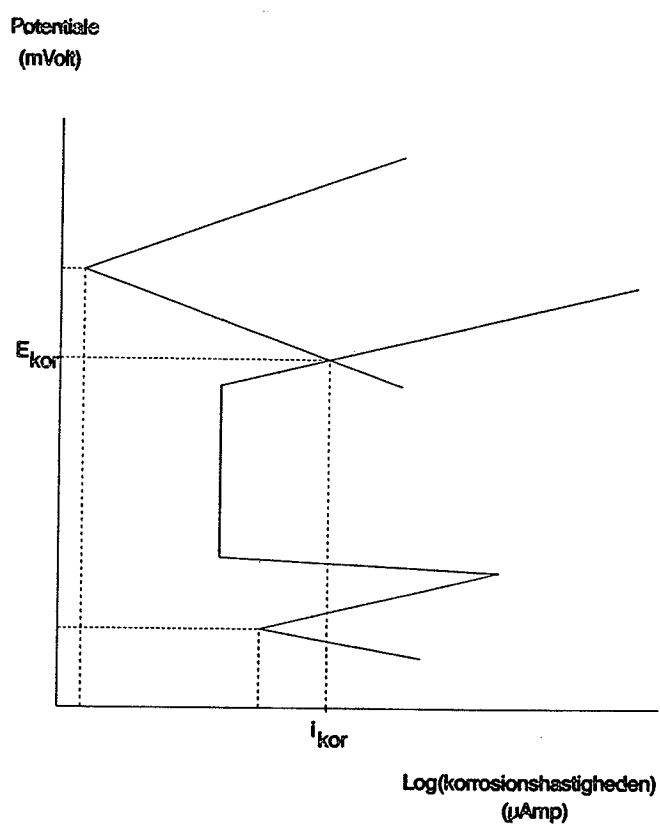
Figur 7.5 a Skitseret polarisationskurve for jern med oxidationsgrenen (a) og reduktionsgrenen (b). (E_0 repræsenterer normalpotentialet for jern og i_0 er udvekslingsstrømtætheden svarende til hastigheden af oxidationen/reduktionen af jernet).



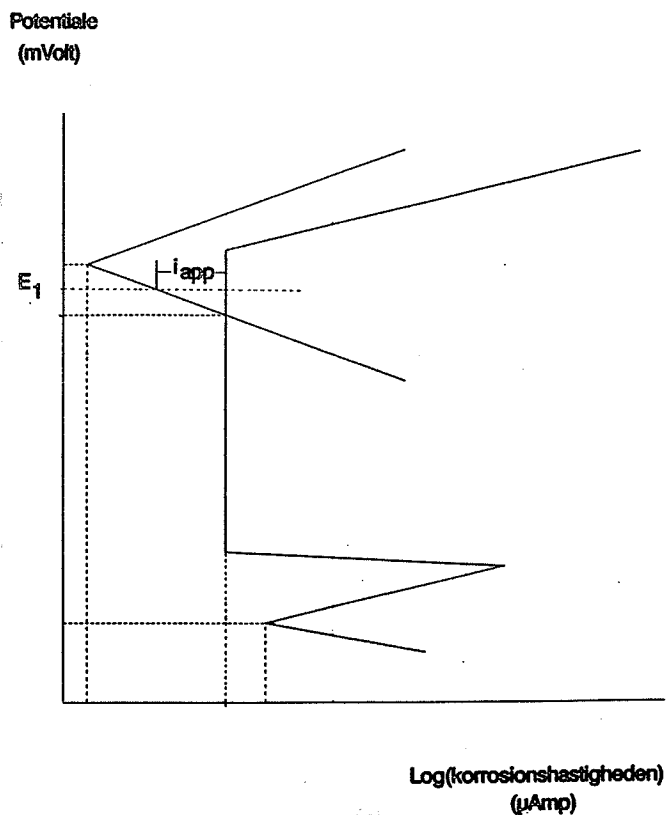
Figur 7.5 b Skitseret polarisationskurve for ilt med oxidationsgrenen (a) og reduktionsgrenen (b). (E_0 er normalpotentialet for ilt og i_0 er udvekslingsstrømtætheden svarende til hastigheden af oxidationen/reduktionen af ilt).



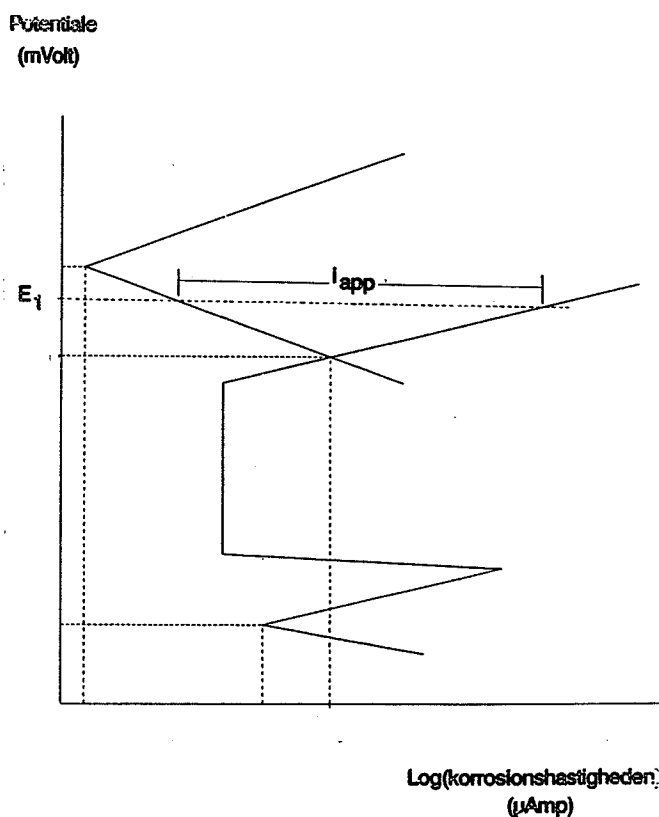
Figur 7.6 a Polarisationskurver for jern og ilt før kloridindtrængning.



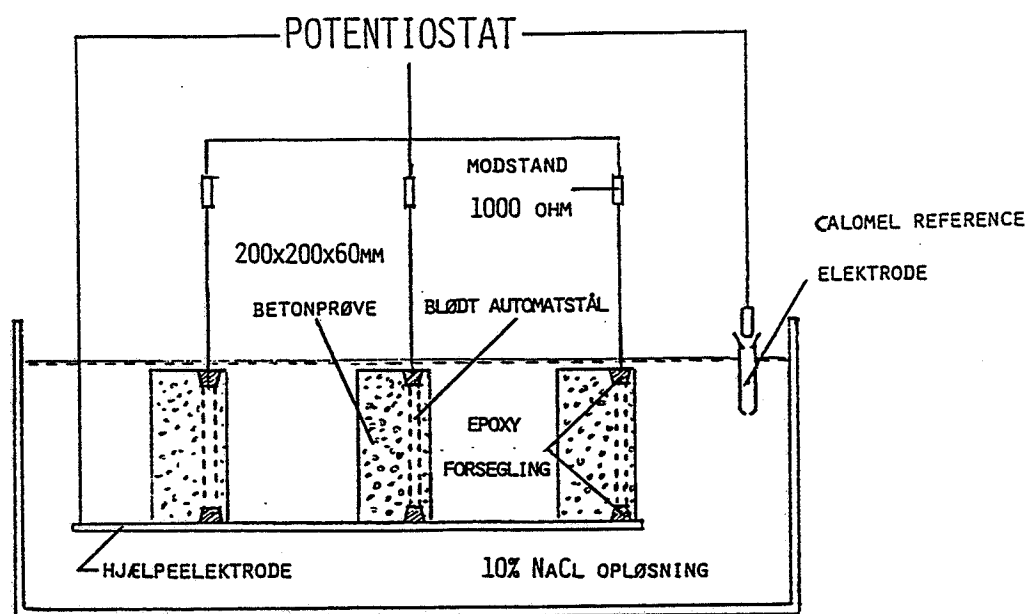
Figur 7.6 b Polarisationskurver for jern og ilt efter kloridindtrængning.



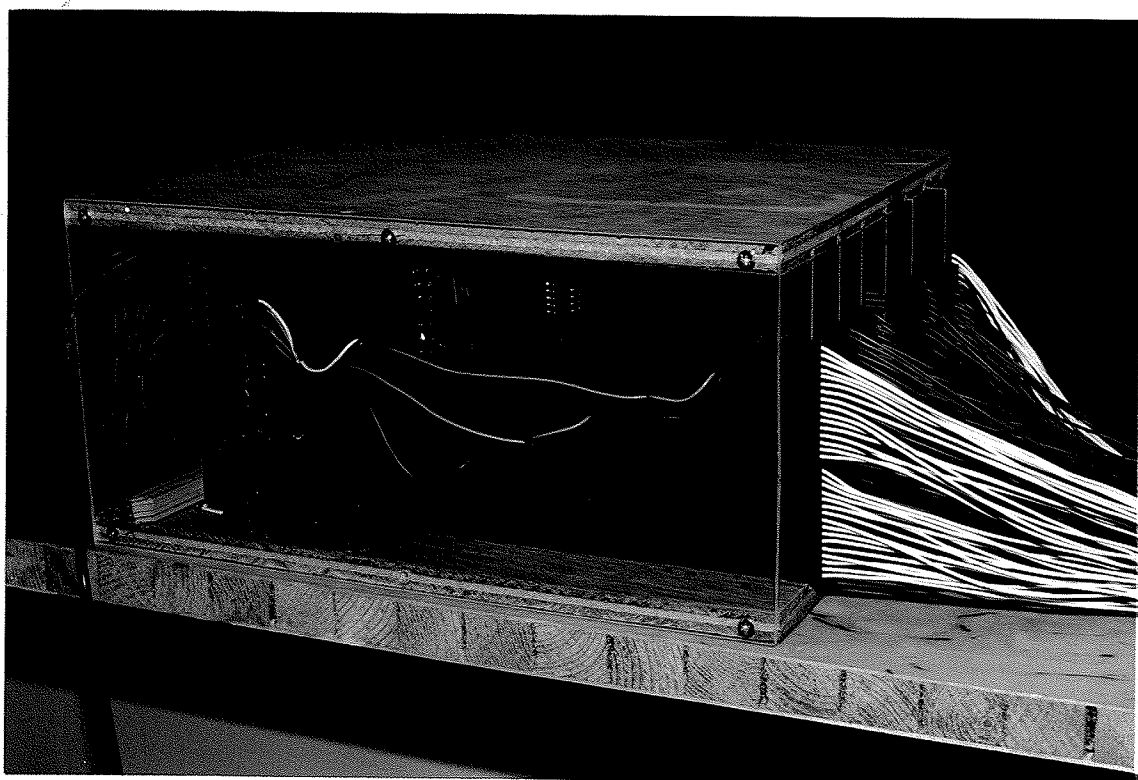
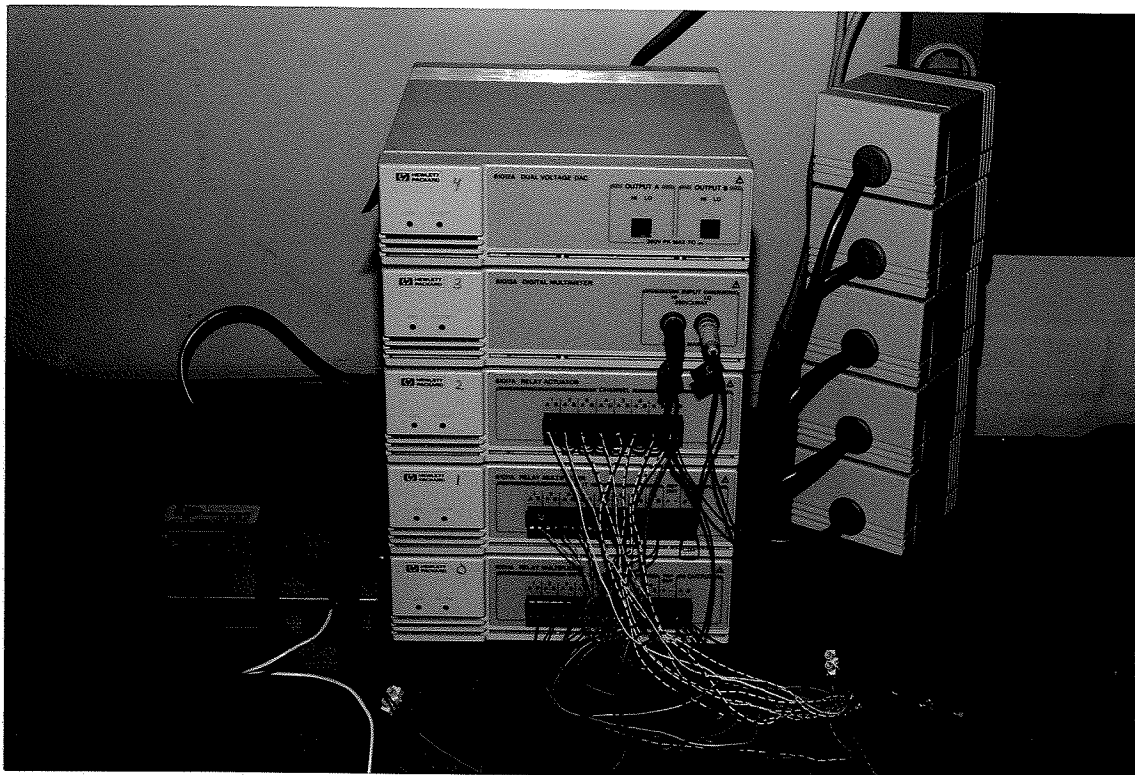
Figur 7.7 a Polarisationskurver for jern og ilt før kloridindtrængning med angivelse af den strømstyrke (i_{app}) som potentiostaten må yde for at hæve potentialet af det indstøbte armeringsjern til E_1 .



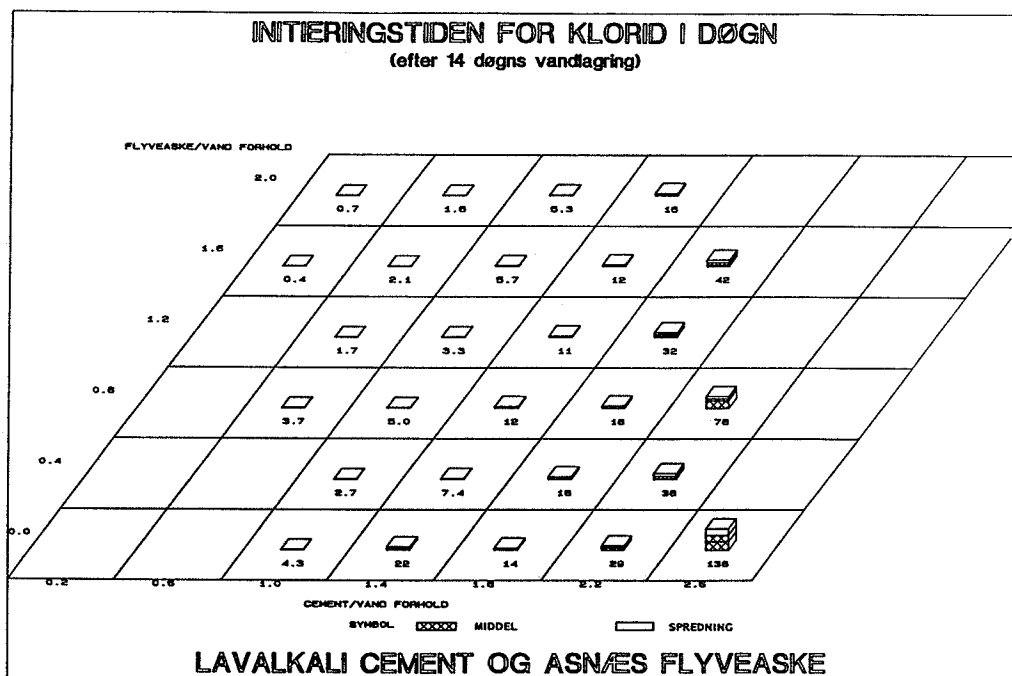
Figur 7.7 b Polarisationskurver for jern og ilt efter kloridindtrængning med angivelse af den strømstyrke (i_{app}), som potentiostaten må yde for at holde potentialet af det indstøbte armeringsjern på E_1 .



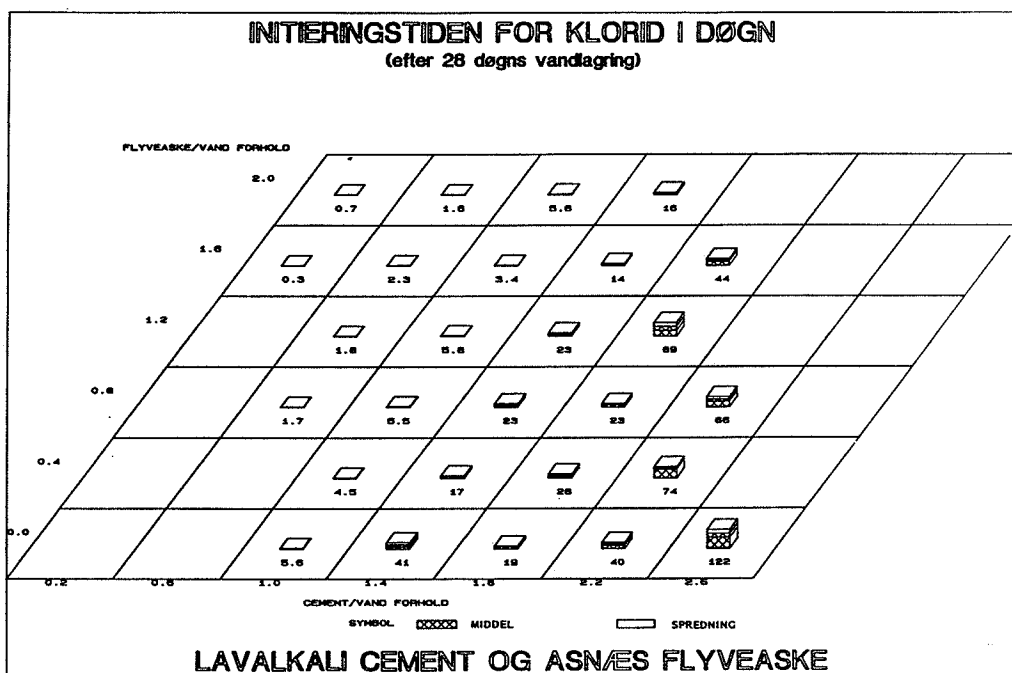
Figur 7.8 Forsøgsopstilling til bestemmelse af kloridindtrængningstiden i betonprøven.



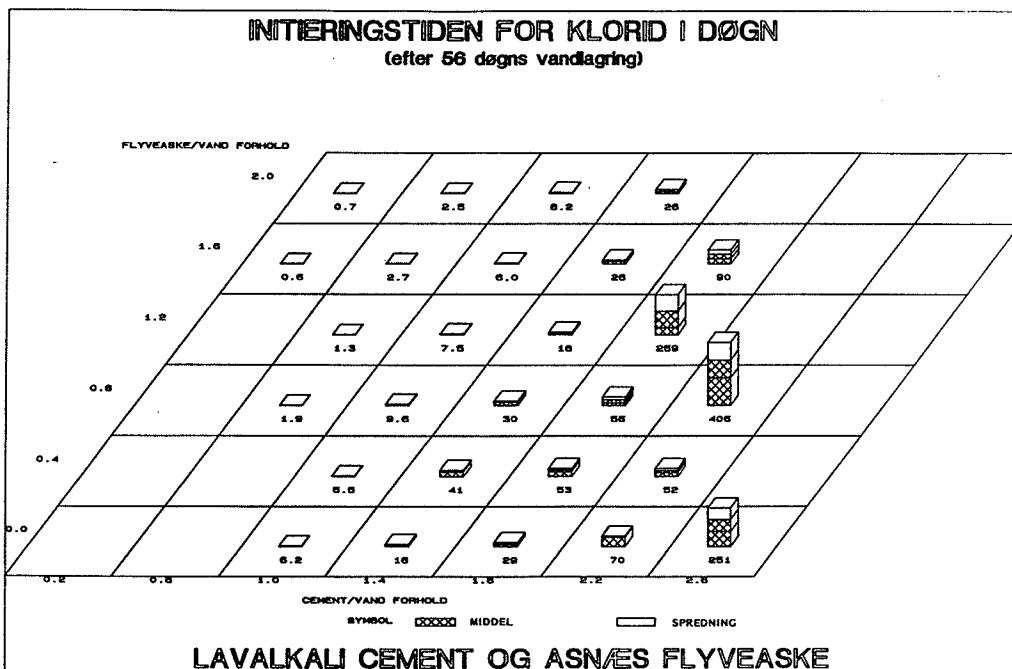
a)



b)

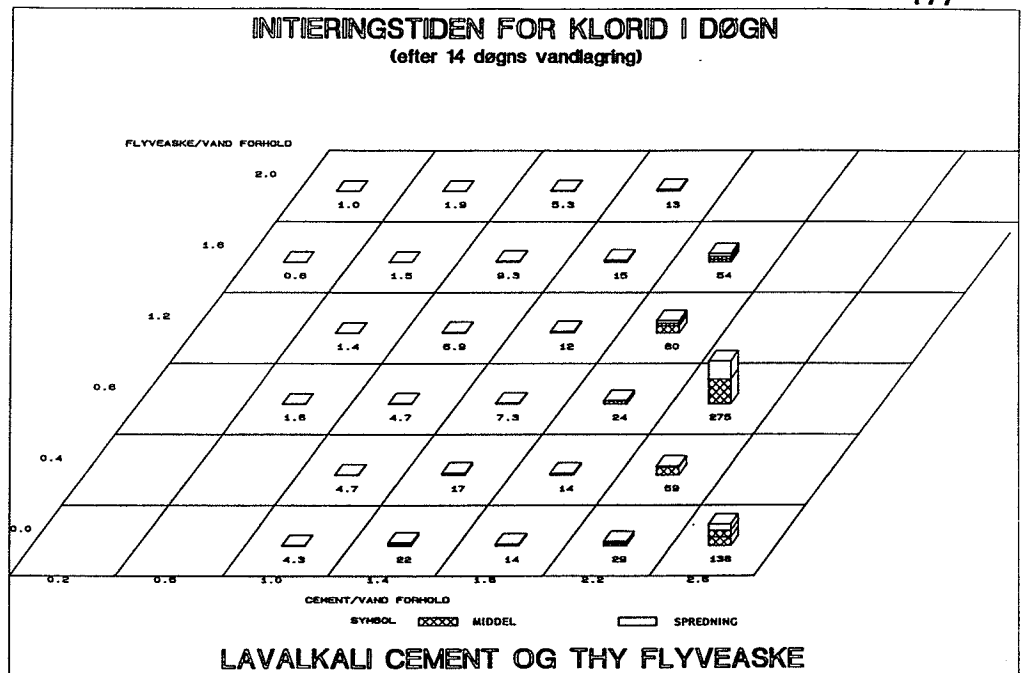


c)

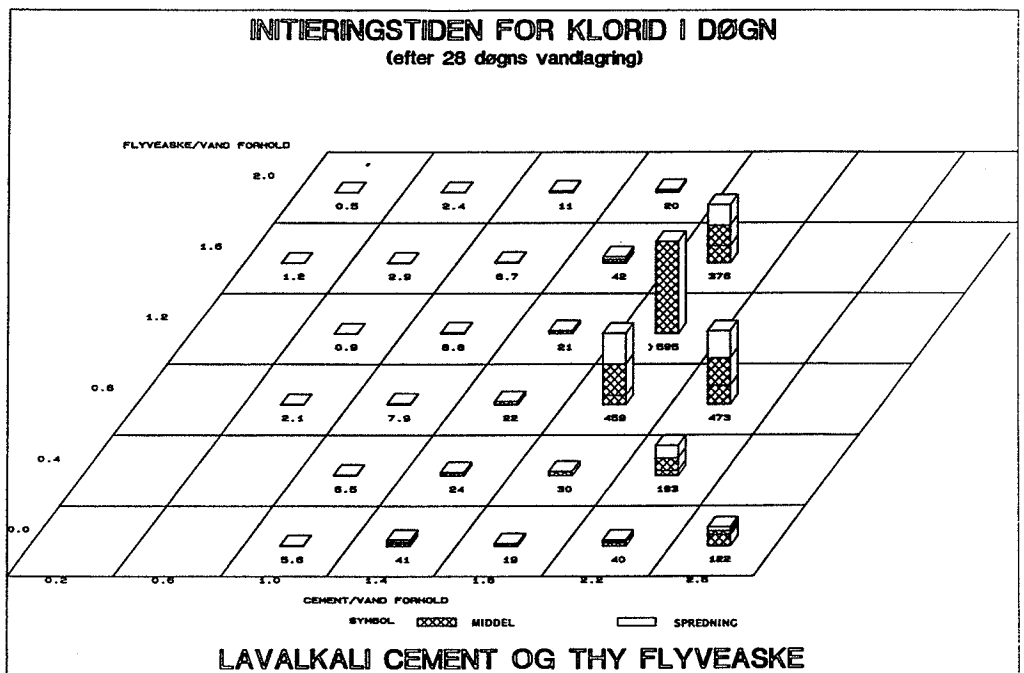


Figur 7.11 a, b og c. Initieringstiden for korrosion af armeringsjern i døgn for betoner i serie 1 efter forudgående vandlagring i 14, 28 og 56 døgn. (I figurene er indlagt grænselinier for betoner med initieringstider større end ca. 600 døgn).

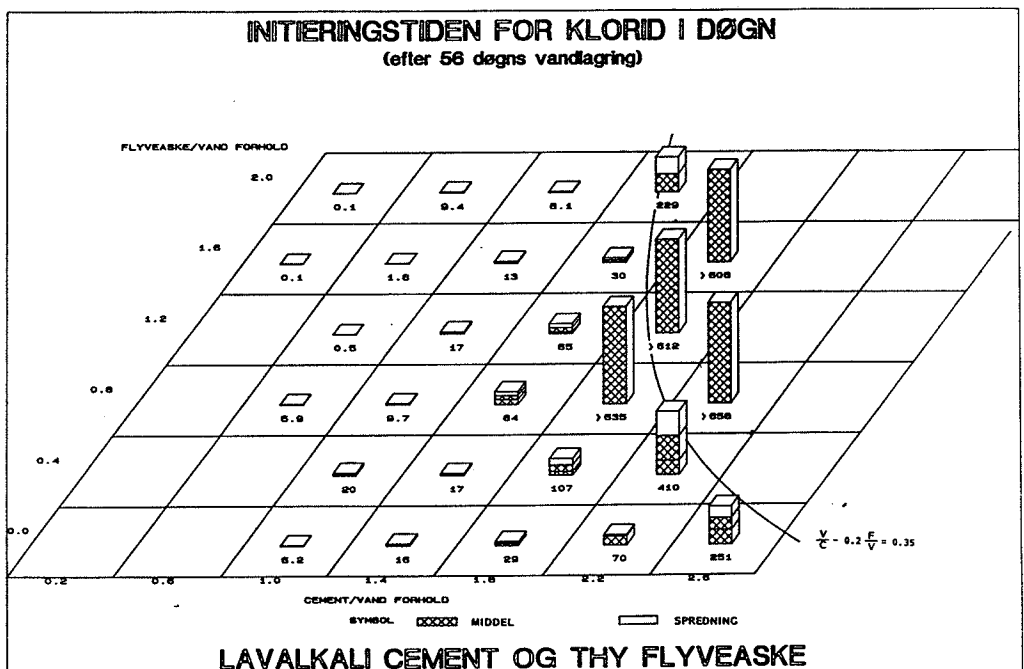
d)



e)

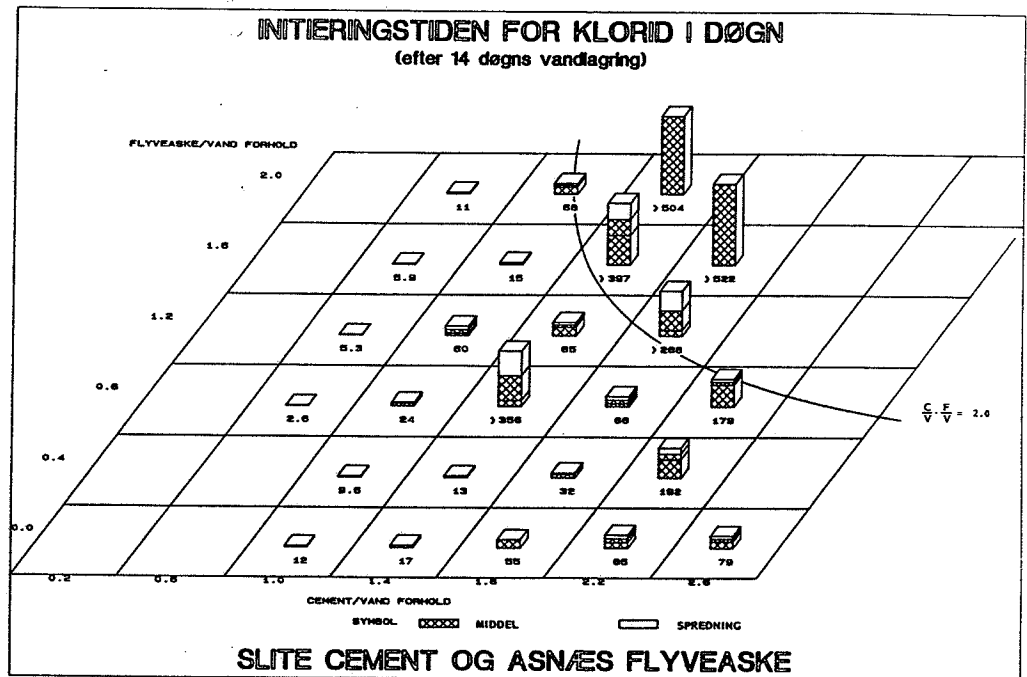


f)

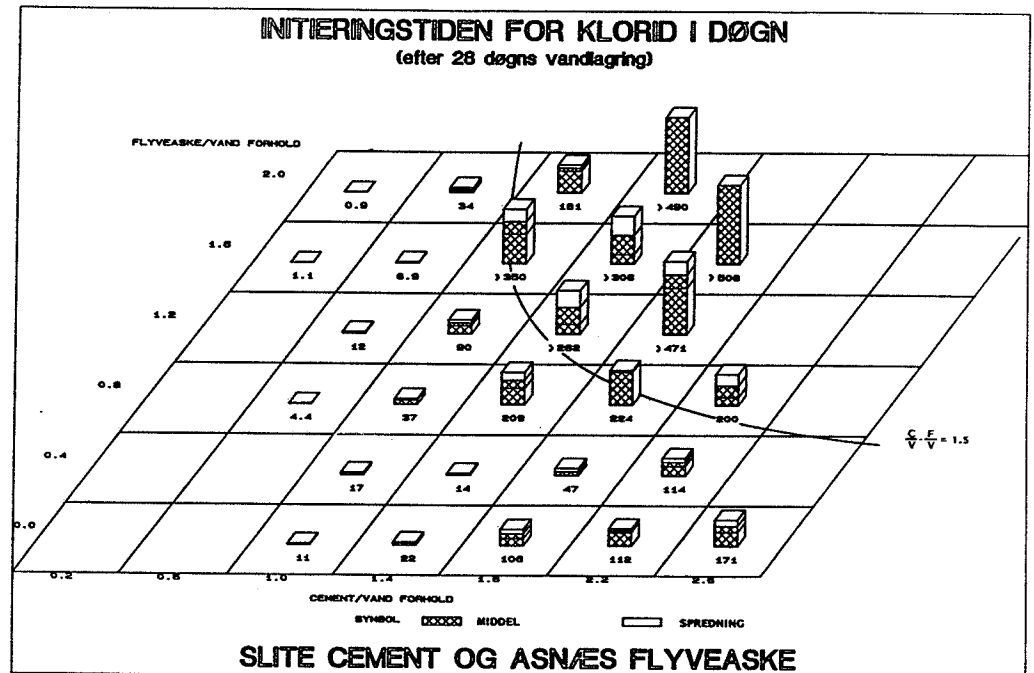


Figur 7.11 d, e og f. Initieringstiden for korrosion af armeringsjern i døgn for betoner i serie 1 efter forudgående vandlagring i 14, 28 og 56 døgn. (I figurene er indlagt grænselinier for betoner med initieringstider større end ca. 600 døgn).

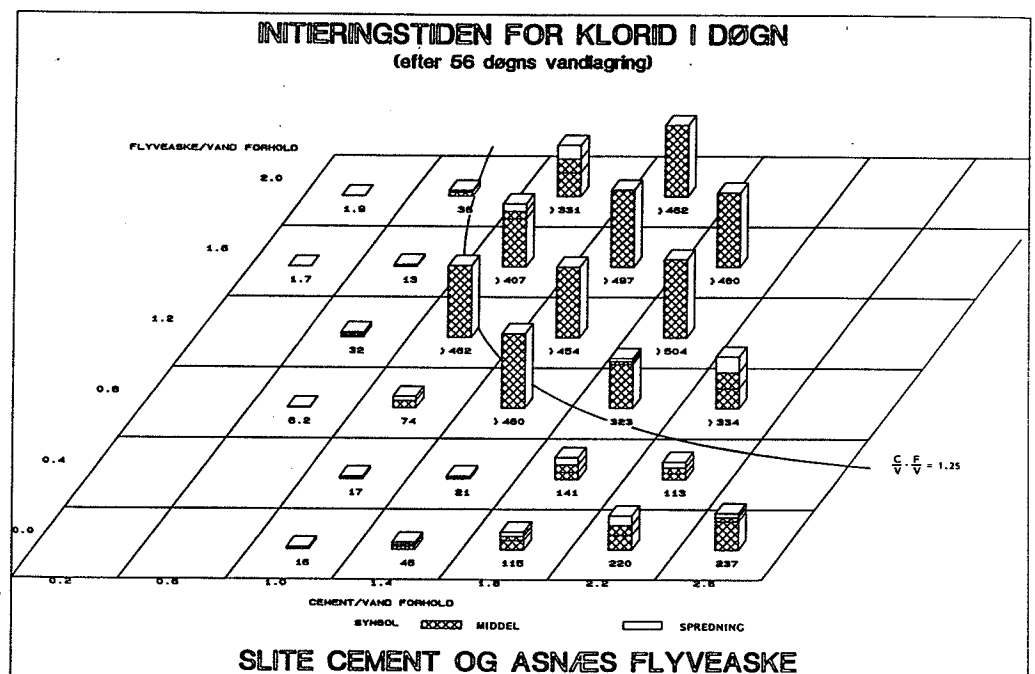
g)



h)

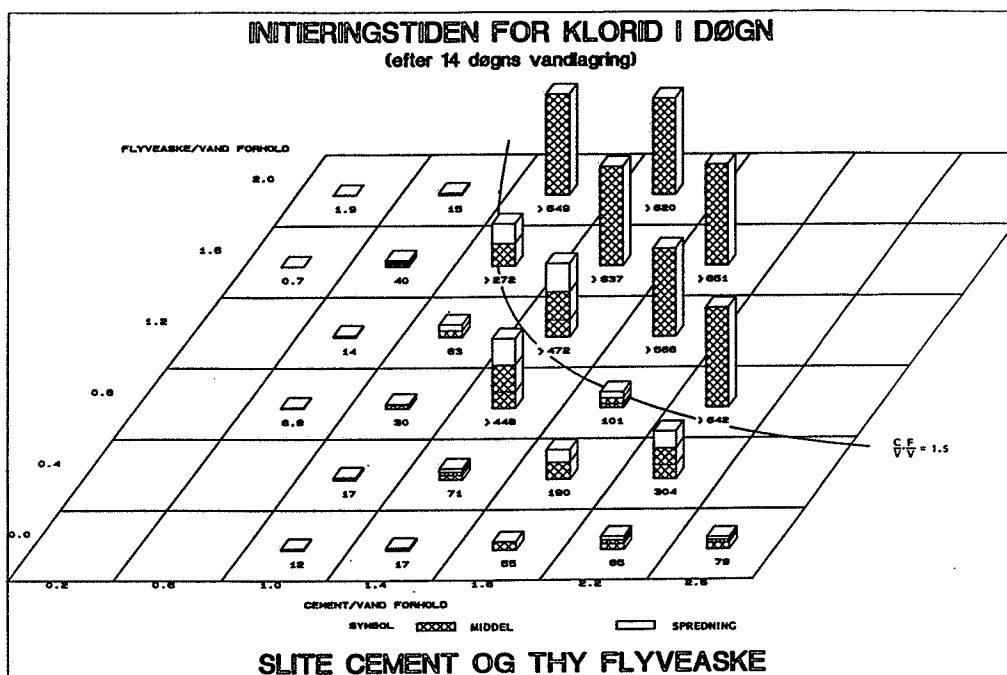


i)

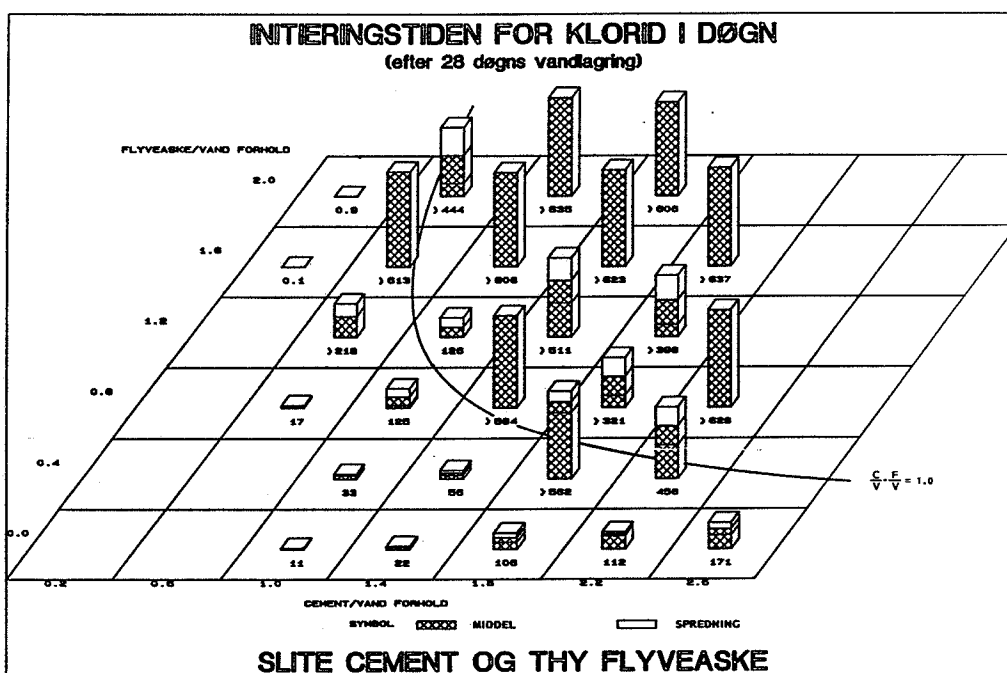


Figur 7.11 g, h og i. Initieringstiden for korrosion af armeringsjern i døgn for betoner i serie 1 efter forudgående vandlagring i 14, 28 og 56 døgn. (I figurerne er indlagt grænselinier for betoner med initieringstider større end ca. 600 døgn).

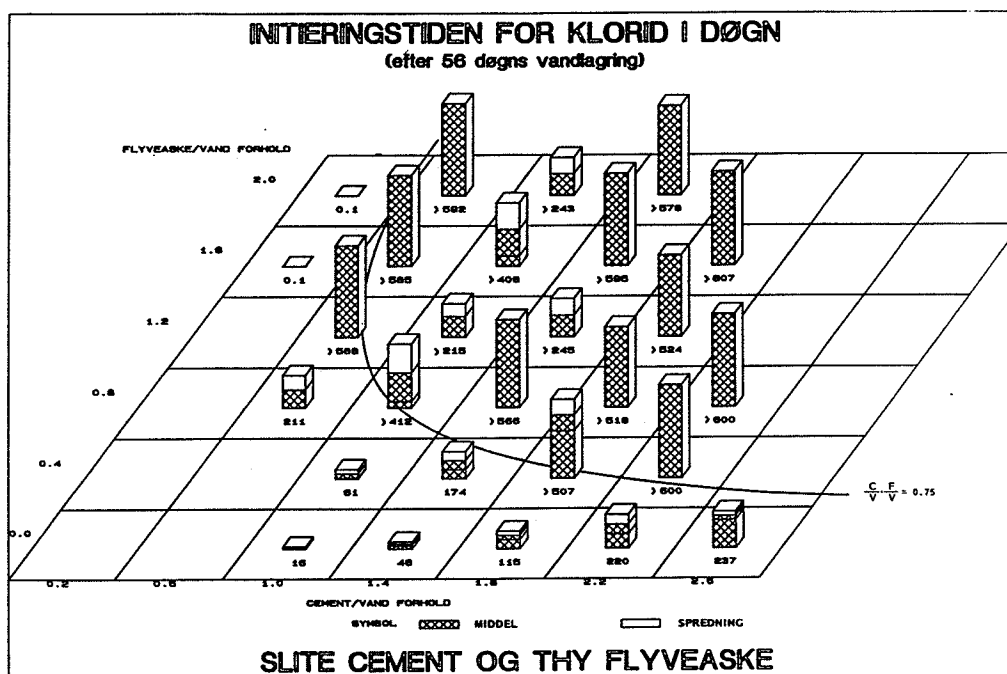
j)



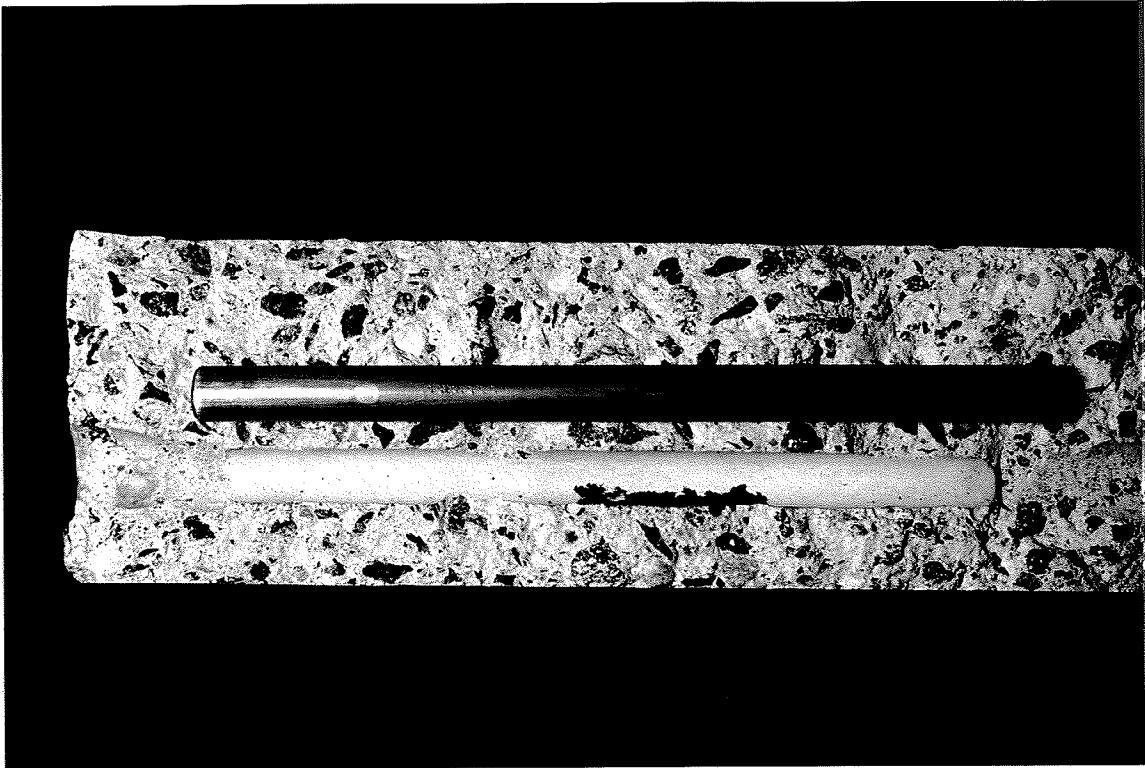
k)



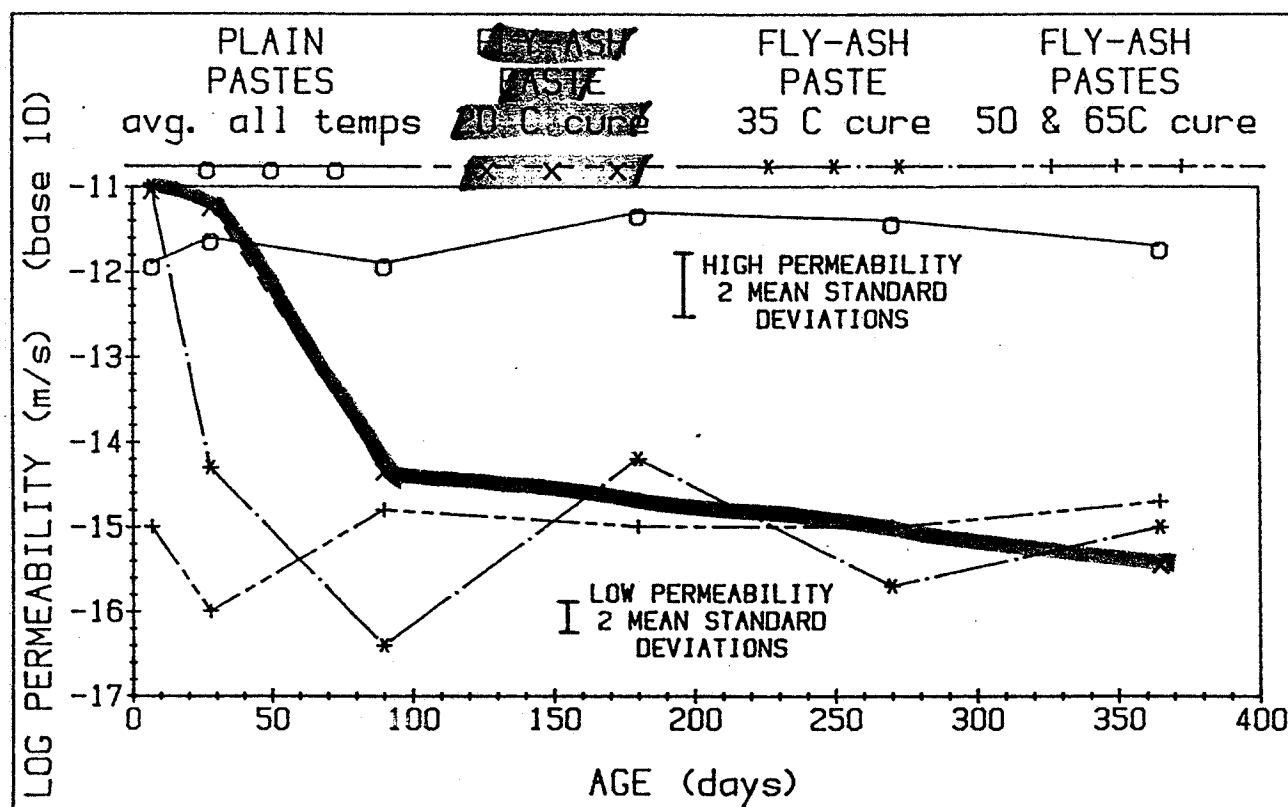
l)



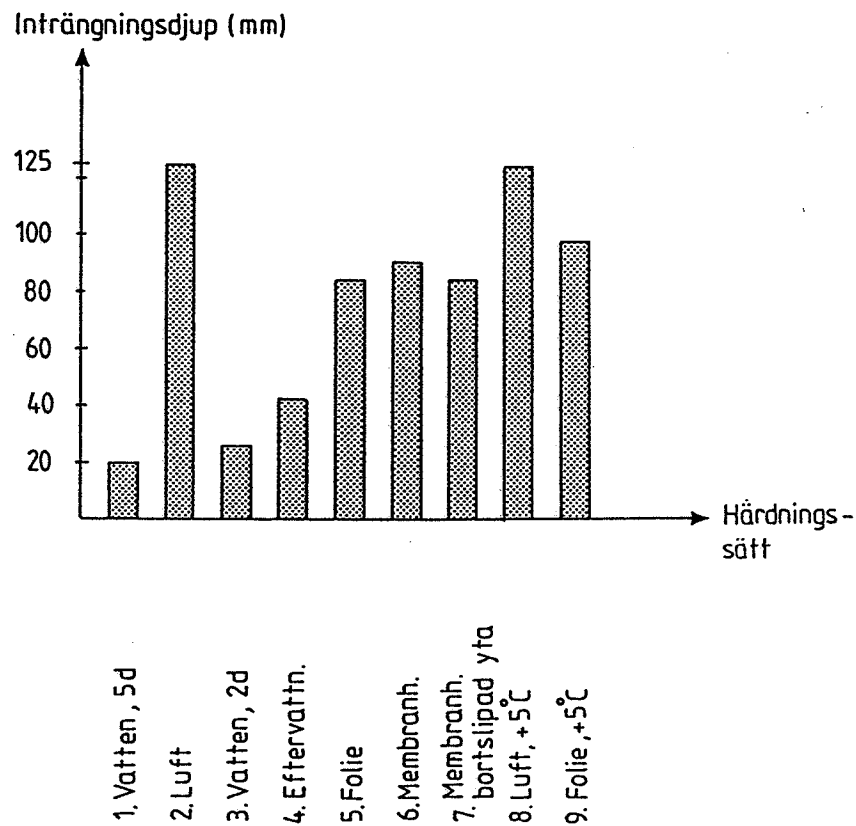
Figur 7.11 j, k og l. Initieringstiden for korrosion af armeringsjern i døgn for betoner i serie 1 efter forudgående vandlagring i 14, 28 og 56 døgn. (I figurene er indlagt grænselinier for betoner med initieringstider større end ca. 600 døgn).



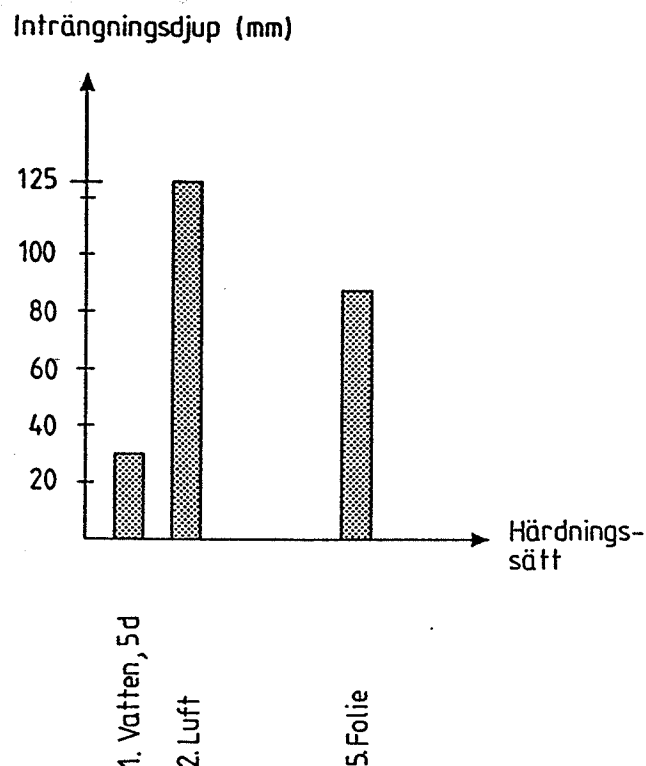
Figur 7.12 Flækket betonprøve med tydeligt eksempel på korrosionsangreb.



Figur 8.1 Virkning af hærningstid og temperatur på flyveaske-pastaers permeabilitet (fra ref. 84).

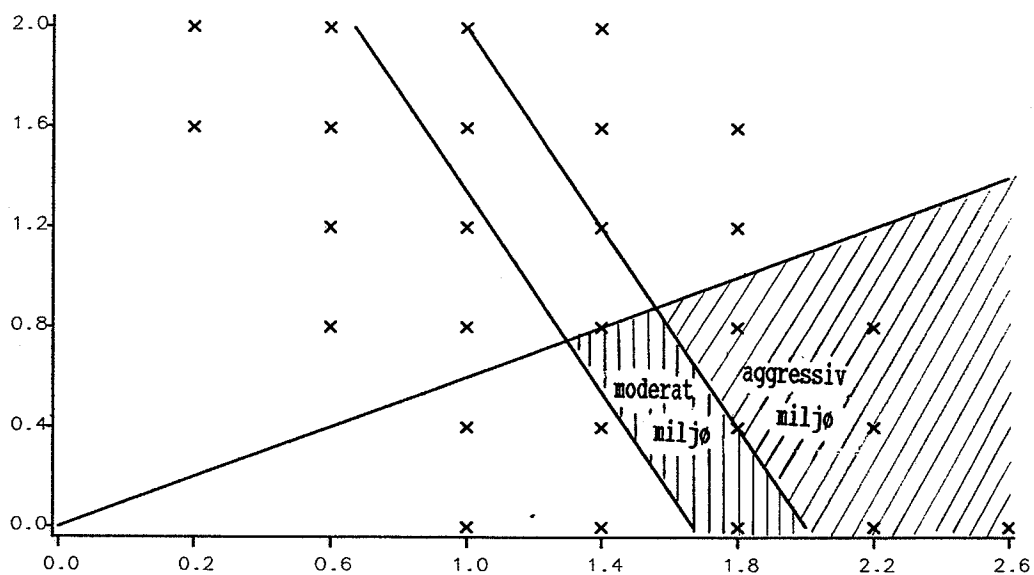


Figur 8.2 a Vandindtrængning i almindelig beton uden flyveaske ($v/c = 0,5$), som funktion af lagringsprocedure (fra ref. 90).



Figur 8.2 b Vandindtrængning i beton med 30% flyveaske ($v/c_{\text{ekv}} = 0,5$) som funktion af lagringsprocedure (fra ref. 90).

Flyveaske/vand forhold



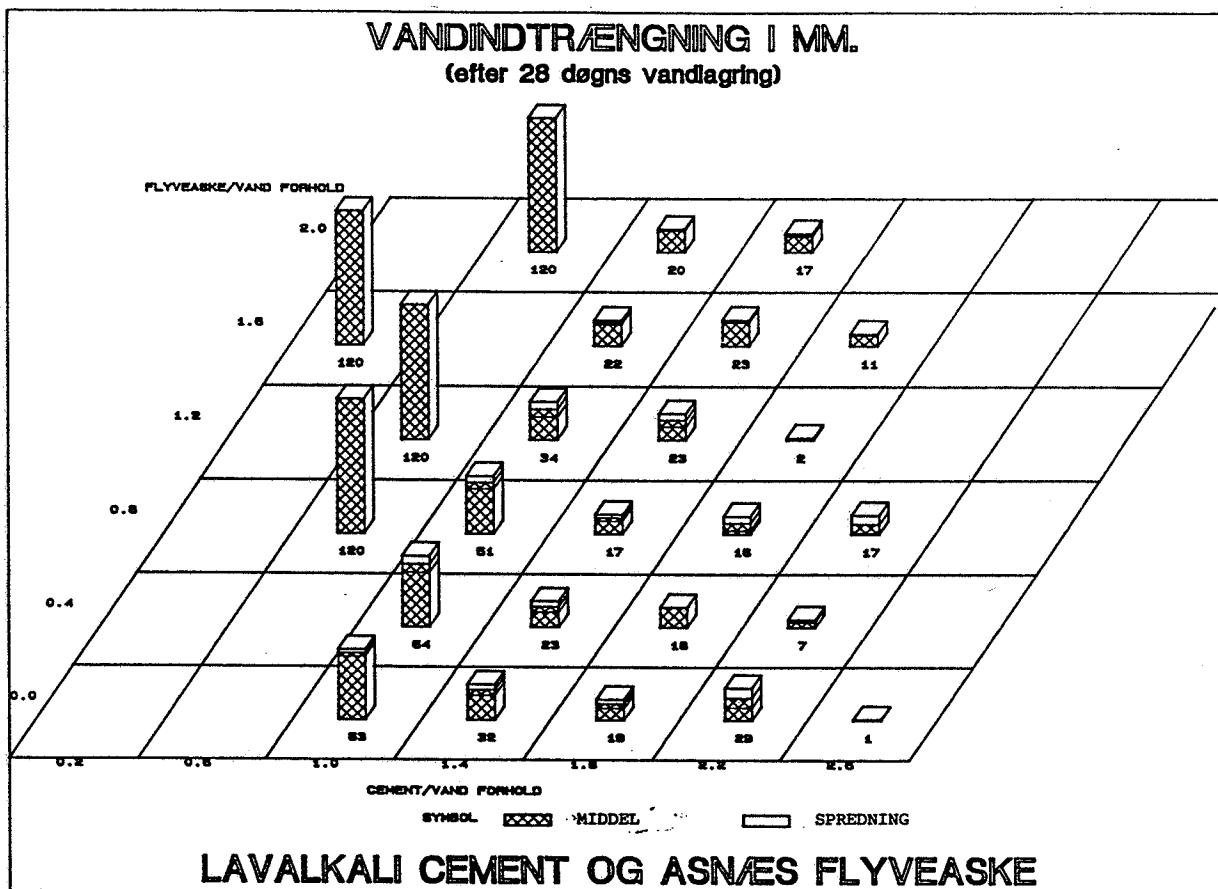
Cement/vand forhold

Figur 8.3

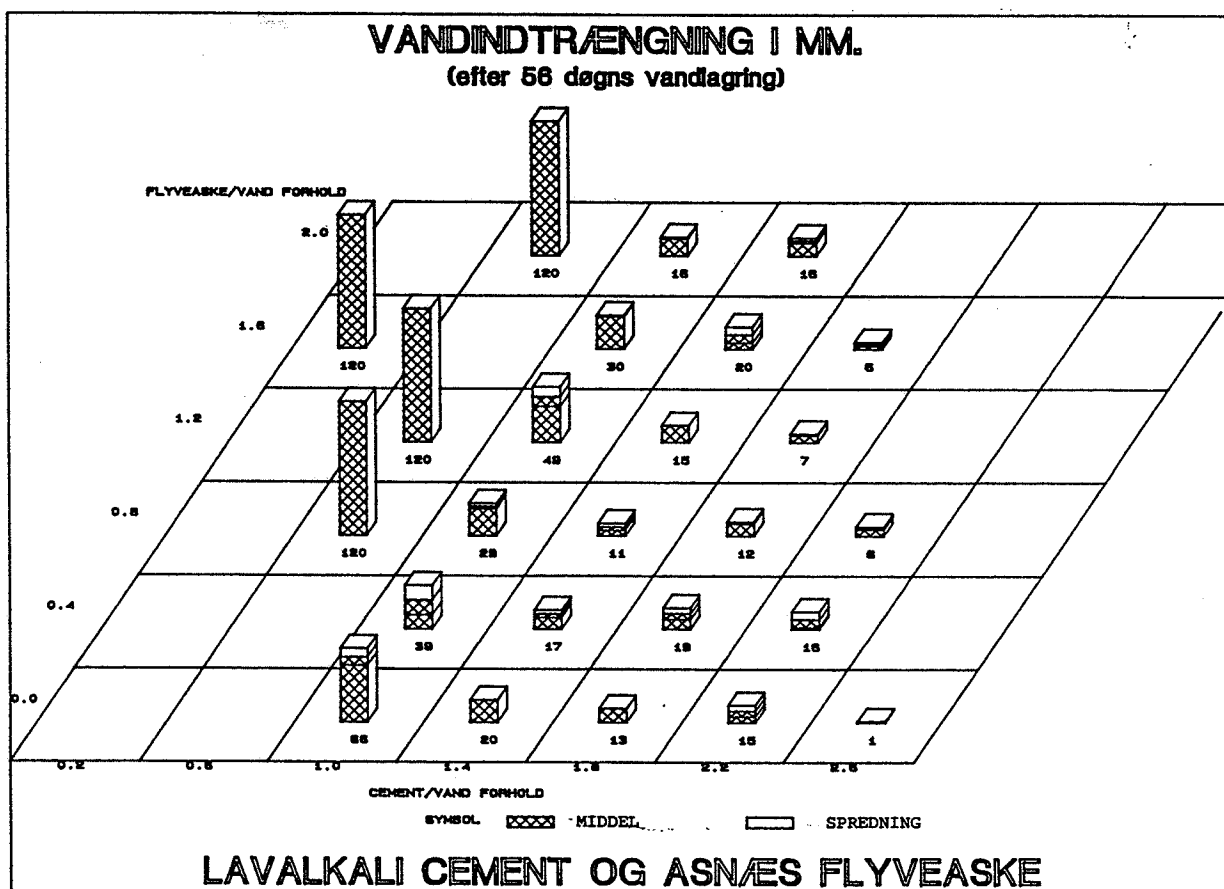
Den danske betonnorms begrænsninger for anvendelse af flyveaske i armerede betonkonstruktioner. De i henhold til normen tilladte betonblandinger i henholdsvis moderat og aggressiv miljøklasse er skraverede.



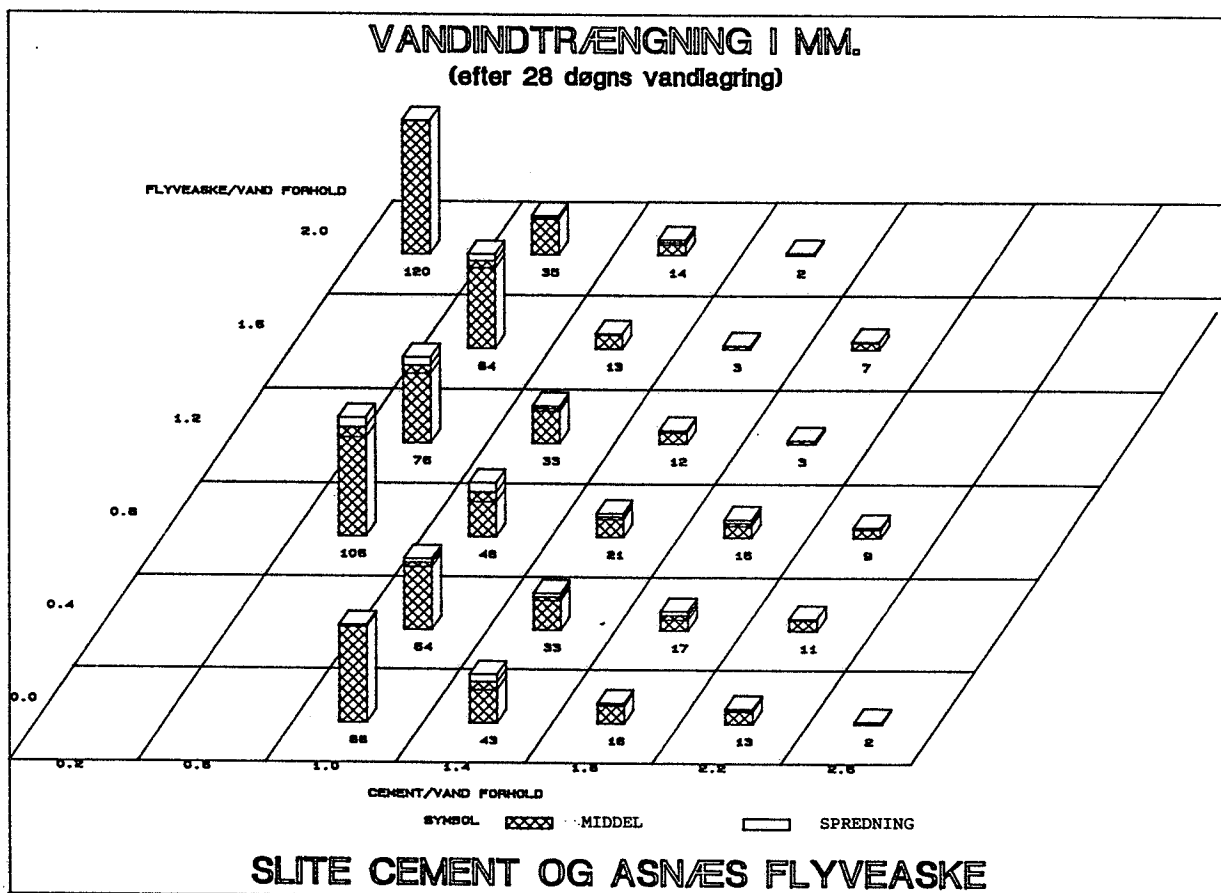
Figur 8.4 Apparaturl til målring af vandindtrængningsdybde i beton i henhold til DIN 1048.



Figur 8.5 a Vandindtrængningsdybden i betoner fra serie 1 efter 28 døgns vandlagring.



Figur 8.5 b Vandindtrængningsdybden i betoner fra serie 1 efter 56 døgns vandlagring.



Figur 8.5 c Vandindtrængningsdybden i betoner fra serie 3 efter 56 døgns vandlagring.

Erratum til Teknisk Rapport nr. 221/90.

Side	Tekst	Rettelse
8 ¹⁶	indtrængningstider	indtrængningsdybder
14 ³	K_d , som angiver hvor mange kg flyveaske,	K_d , som angiver flyveaskens reaktionsevne i forhold til cementens reaktionsevne. Den resiprokke værdi af K_d angiver således hvor mange kg flyveaske, der kan erstatte 1 kg cement,
15 ⁷	, faste, runde, men hule partikler..	, faste, runde, ofte hule partikler..
41 ₅	..de øvre grænser for gyldigheden..	..de nedre grænser for gyldigheden..
43 ₁₁	er forskellig fra nul	er lig med nul
56 ₁₅	Koncentrationen af kloridioner,..	Koncentrationen af hydroxylioner,..
58 ₈	.. for kloridioner, ($\text{mm}^3/\text{år}$)	..for kloridioner, ($\text{mm}^2/\text{år}$)
99 ₈	.. ialt 15 betoner uden flyveaske,	..ialt 15 permeabilitetskoefficienter for betoner uden flyveaske,
123 ¹	(REFERENCEBLANDINGERASKE)	(REFERENCEBLANDINGER)
138 (Tabel 7.6d, $c/v=1$, $f/v=1.2$, 56 døgn)	>415	>215
177 (Figur 7.11d, $c/v=2.2$, $f/v=0.8$)	275	>275
177 ₅	..betoner i serie 1..	..betoner i serie 2..
178 ₅	..betoner i serie 1..	..betoner i serie 3..
179 ₅	..betoner i serie 1..	..betoner i serie 4..
183 (Figur 8.3)		(X-aksen er skaleret forkert, hvilket medfører at linien for 35% flyveaske gennem (0,0) ikke er helt korrekt indtegnet.)